

**RECHNERISCHES BEMESSUNGSKONZEPT FÜR
ABSTURZSICHERNDE GLASTAFELN**

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Stefan Alexander Brendler
aus Sonthofen/Allgäu

Eingereicht am 07. November 2006

Mündliche Prüfung am 19. Januar 2007

Berichterstatter Prof. Dr.- Ing. T. Ummenhofer
Prof. Dr.- Ing. U. Peil

2007

**RECHNERISCHES BEMESSUNGSKONZEPT FÜR
ABSTURZSICHERNDE GLASTAFELN**

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Stefan Alexander Brendler
aus Sonthofen/Allgäu

Eingereicht am 07. November 2006

Mündliche Prüfung am 19. Januar 2007

Berichterstatter Prof. Dr.- Ing. T. Ummenhofer
Prof. Dr.- Ing. U. Peil

2007

KURZFASSUNG

Das Bau- oder Arbeitsrecht fordert für das Szenario „Menschanprall“ an absturzsichernden Bauteilen unterschiedliche Nachweise zur Beurteilung der Tragfähigkeit betroffener Konstruktionselemente.

Für absturzsichernde Verglasungen fordert das Baurecht, den Anprall eines Menschen auf eine Glastafel ersatzweise mit einem Pendelschlagversuch zu simulieren. Die Fallhöhe, aus der ein Stoßkörper horizontal auf eine Glastafel pendelt, wird im Versuch so eingestellt, dass ein pauschaler Sicherheitszuschlag bereits berücksichtigt ist. Streuende Einflüsse wie unterschiedliche Werkstofffestigkeiten, Montagefehler, statistische Unschärfen (Probenzahl), örtliche Gegebenheiten etc. werden hierdurch abgedeckt. Der Versuch wird als „bestanden“ gewertet, falls nach der Durchführung keine oder nur geringfügige Schäden an der Konstruktion aufgetreten sind. Aussagen über das tatsächlich vorhandene Sicherheitsniveau sind damit jedoch nicht möglich.

Prinzipiell lässt sich die Stoßsicherheit auch rechnerisch nachweisen, jedoch werden solche Nachweise von der Bauaufsicht noch nicht in allen Bundesländern anerkannt.

Prallt ein Mensch gegen eine Glastafel, so ist er nur etwa 100 Millisekunden mit dieser in Kontakt. Die zahlreichen Faktoren, die dieses Stoßereignis beeinflussen, sind in der vorliegenden Arbeit untersucht. Es wird eine allgemeingültige rechnerische Lösung entwickelt, mit der liniengelagerte Glastafeln, die dem Anprall eines Menschen standhalten sollen, wirtschaftlich dimensioniert werden können. Als Voraussetzung dazu sind folgende Teilaufgaben erarbeitet:

1. Die baurechtlichen Anforderungen und mechanischen Auswirkungen des Anprallerereignisses eines Körpers auf Glastafeln werden dargestellt.
2. Es wird gezeigt, wie qualifizierte rechnerische FE – Simulationen des Pendelschlagversuches aufgebaut sein müssen.

Als wesentliches Ergebnis der vorliegenden Arbeit wird ein Bemessungsvorschlag zum rechnerischen Nachweis absturzhemmender Glastafeln vorgestellt.

Dieser Bemessungsvorschlag wird abschließend rechnerisch unter Verwendung von Menschensimulationen (Dummys) bestätigt. Ergänzend werden die sich für den anprallenden Menschen ergebenden Folgen bewertet.

Die Arbeit belegt, dass sich der Pendelschlag gegen Glastafeln rechnerisch mit einer hohen Aussagewahrscheinlichkeit simulieren lässt. Die charakteristische Einwirkung auf Glasbauteile beim Menschenanprall wird berechnet und bestehenden Forderungen aus Regelwerken zum Nachweis von Bauteilen aus anderen Werkstoffen, die gegen Absturz sichern, gegenübergestellt. Hierfür wurden Hilfsmittel aus dem Automobilbau wie z. B. Dummys für die Crashtestsimulation verwendet. Neben den Anprallszenarien infolge „üblicher“ Nutzung werden Extremsituationen mit hoher Anprallgeschwindigkeit einer Person z. B. auf Inline – Skatern oder einem Skateboard beurteilt.

Die validierten FE – Simulationen des Pendelschlagversuches belegen, dass sich die Steifigkeit von Glas beim Stoßkörperanprall gegenüber der Steifigkeit bei statischer Einwirkung ändert. Dies wurde durch entsprechende Bauteilversuche überzeugend bestätigt.

ABSTRACT

Some parts of buildings e.g. balustrades or walls must for safety reasons be able to withstand a human impact. Different fields of law demand different scenarios for estimating the load-carrying capacity of structural members subjected to this impact.

According to the German building authority a pendulum impact test is required for glass structures acting as safety barriers simulating the impact of a human. This test uses an impact body made of tires, striking the glass pane horizontally. The approach is based on an overall safety concept. The effect of varying material properties, unequal geometrical parameters, of a small number of samples etc. may significantly influence the load carrying capacity. The test is considered as passed, if no or only minor damage occurs. Conclusions about the magnitude of the load carrying capacity and the safety level of the construction cannot be drawn.

The pendulum impact test can also be simulated by computational means; however up to now such analyses are not accepted for design by the German building authority. If a human body collides with a glass pane, the bodies are in contact for only 100 milliseconds. Many factors like location of impact, glass thickness etc. influence the vibration behaviour and the level a glass pane is stressed.

This work introduces a general concept for computationally analysing the impact of a human body on glass panes. Based on this approach glass panes can be assessed resulting in economical and safe glass structures

In this context the following subtasks are investigated:

- The rules from the building authority and the mechanical effects of the impact on a glass pane are presented.
- The proposed finite element model of the standard pendulum impact test is introduced and validated, providing a number of benchmark tests.
- In order to verify the impact force and the correlating falling height which is demanded by the building authority for a human body colliding with a glass pane, numerical calculations with crash-test-dummies are performed. Additionally, the load-carrying capacity and the energy absorbed by the glass pane are evaluated.
- The basis in the concept for computationally analysing the impact of a human body is the validated finite element-model for the pendulum impact. It is used for simulating the impact on other glass panes for the real building. The required energy as criterion for deciding if a glass pane can withstand a human impact is given for glass balustrades.
- The changing material properties of glass (stiffening) subjected to dynamic impact found in numerical analyses are evaluated and verified by corresponding experiments.

With the general concept for computationally analysing the impact of a human body on glass panes economical and safe glass structures can be designed.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	VIII
Abkürzungen, Bezeichnungen und Werkstoffkennwerte.....	XIII
Abkürzungen XIII	
Bezeichnungen.....	XIV
Werkstoffkennwerte	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines.....	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Vorgehensweise und Gliederung	5
2 Stand der Technik	11
2.1 Allgemeines.....	11
2.2 Baurechtliche Anforderungen an eine absturzsichernde Konstruktion	11
2.2.1 Sicherheitsbedürfnis.....	11
2.2.2 Bauprodukte und Bauarten.....	12
2.2.3 Zustimmung im Einzelfall	13
2.3 Regeln der Technik.....	14
2.3.1 Allgemeines	14
2.3.2 UEAtc-Leitlinie – „Stöße auf undurchsichtige, senkrechte Bauteile“	15
2.3.3 ETB-Richtlinie „Bauteile, die gegen Absturz sichern“	18
2.3.4 Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen.....	22
2.3.5 Anforderungen an Umwehrungen in anderen deutschen Regelwerken	24
2.3.6 Anforderungen an Umwehrungen in anderen europäischen Ländern	26
2.3.7 Auflistung und Diskussion der in unterschiedlichen Regelwerken geforderten Fallhöhen und charakteristischen Energien E_{Basis}	27
2.4 Der Pendelschlagversuch	30
2.4.1 Allgemeines	30
2.4.2 Wechselwirkung zwischen Stoß- und Prüfkörper	32
2.4.3 Stoßkörperarten.....	33
2.4.4 Fallhöhen.....	34

2.4.5	Reproduzierbarkeit von Pendelschlagversuchsergebnissen	35
2.4.6	Versagenszustand	39
2.5	Glaseigenschaften	39
2.6	Zusammenfassung	40
3	Rechnerische Simulation des Pendelschlagversuchs	42
3.1	Allgemeines	42
3.2	Der Pendelschlagversuch nach DIN EN 12600	45
3.2.1	Stoßkörper	45
3.2.2	Stoßkörpergeschwindigkeit	46
3.2.3	Trägheitsmoment des Stoßkörpers	49
3.2.4	Stoßkörpersteifigkeit	50
3.2.5	Kontaktfläche des Stoßkörpers	50
3.3	Glastafeln unter stoßartiger Einwirkung	50
3.3.1	Dynamische Bauteilsteifigkeit unter Stoßeinwirkung	50
3.3.2	Schwingungsverhalten - Wellenausbreitung	51
3.4	Simulation des Stoßes mit Ersatzmodellen	54
3.4.1	Allgemeines	54
3.4.2	Statisches Modell und Eingangswerte	54
3.4.3	Berechnungen mit dem Zweimassenschwingermodell und Wertung der Ergebnisse	58
3.5	Finite - Elemente - Modellierung	68
3.5.1	Referenzlösungen: Schritte zum geeigneten Modell	68
3.5.2	Referenzlösungen zur Validierung des Stoßkörpermodells nach DIN EN 12600	69
3.5.3	Referenzlösungen zur Validierung des Glastafelmodells	71
3.5.4	Einfluss der Linienlagerung	73
3.5.5	Referenzlösungen zur Validierung von MSI-Modellen	77
3.6	Simulation des Stoßvorganges mit SJ MEPLA	78
3.6.1	Allgemeines	78
3.6.2	Validierung des FE – Modells	79
3.6.3	Ergebnisse mit dem validierten FE – Modell	79
3.6.4	Parameterstudie	81
3.6.5	Einfluss der Lagersituation	91
3.6.6	Verteilung der Auflagerkräfte	91
3.6.7	Energieverteilung beim Stoß	92
3.7	Simulation des Stoßvorganges mit LS-DYNA	93
3.7.1	Allgemeines	93
3.7.2	Abbildung des Stoßkörpers als detailliertes FE – Modell	93
3.7.3	Validierung des Stoßkörpermodells	96

3.7.4	Kalibrierung des FE - Prüfkörper - Modells	98
3.7.5	Validierung des FE - Prüfkörper - Modells.....	102
3.8	Gegenüberstellung der Ergebnisse von SJ MEPLA und LS-DYNA	104
3.8.1	Stoßkörpermodellierung.....	104
3.8.2	Pendelschlagversuche auf eine monolithische Glastafel	106
3.8.3	Pendelschlagversuche auf Mehrscheiben-Isolierglas	112
3.9	Diskussion der Ergebnisse.....	114
3.9.1	Dynamischer Elastizitätsmodul.....	114
3.9.2	Verbundverhalten unter Stoßeinwirkung	118
3.9.3	Gegenüberstellung Bauteilversuch – rechnerische Simulation	120
3.10	Zusammenfassung	122
4	Bemessungsvorschlag zur rechnerischen Bewertung der Tragfähigkeit einer absturzhemmenden Glastafel	124
4.1	Allgemeines.....	124
4.2	Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept	126
4.2.1	Charakteristische Einwirkung infolge des Menschenanpralls.....	126
4.2.2	Charakteristische Werkstoffeigenschaften bei Stoßeinwirkung	127
4.2.3	Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen, Werkstoff- und Fertigungsstreuungen.....	127
4.2.4	Bemessungswert der Einwirkungen	128
4.2.5	Bemessungswert der Widerstandsgröße.....	131
4.2.6	Erfahrungen aus der Baupraxis	131
4.3	Rechnerische Beurteilung der Absturzhemmung einer Glastafel – Vorschlag eines Nachweiskonzeptes	131
4.3.1	Vordimensionierung einer absturzsichernden Glastafel.....	132
4.3.2	Ablaufdiagramm zum Bemessungsvorschlag	134
4.3.3	Übliche Nutzung - Gefahrenbild	135
4.3.4	Definition: „leichte“ und „schwere“ Glastafeln	135
4.3.5	Spannungsnachweise und Überprüfung der Lagesicherung.....	137
4.3.6	Zusätzliche Maßnahmen: „Erfahrungslücke“ beim rechnerischen Nachweis.....	138
4.3.7	Bemessung der Unterkonstruktion	140
4.4	Berechnungsbeispiele	141
4.5	Zusammenfassung	141
5	Menschenanprall gegen vertikale Bauteile	144
5.1	Allgemeines.....	144
5.2	Der Mensch als Stoßkörper	145
5.2.1	Unfälle an Glasbauteilen	145

5.2.2	Unterschiedliche Anprallarten (Stoßpositionen)	146
5.2.3	Laufgeschwindigkeiten des Menschen.....	146
5.2.4	Wirksame Masse des Menschen	146
5.2.5	Steifigkeit des Menschen beim Anprall	147
5.2.6	Der Mensch als Mehrmassensystem	152
5.2.7	Kontaktzeiten des Stoßkörpers nach DIN EN 12600 und des Menschen beim Anprall	156
5.2.8	Verletzungsrisiko beim Anprall an Glasbauteile.....	157
5.3	Ergebnisse aus Versuchen mit anprallenden Menschen	159
5.3.1	Messdaten der Technischen Universität Darmstadt	159
5.3.2	Messdaten des Swedish Council for Building Research	161
5.3.3	Messdaten des Instituts für Fenstertechnik in Rosenheim	166
5.3.4	Messdaten der Technischen Universität Braunschweig	166
5.3.5	Messdaten der Fachhochschule München.....	167
5.3.6	Erkenntnisse aus den Messdaten	171
5.4	Rechnerische Simulation des Anpralls von Menschen mit Dummys	171
5.4.1	Allgemeines	171
5.4.2	FAT ES-2 Dummy	172
5.4.3	Bestätigung des Bemessungsvorschlages mit einem Menschensimulator (Dummy).....	173
5.4.4	Vergleich des Dummys mit dem Pendel nach DIN EN 12600	176
5.4.5	Nachweis von Konstruktionen mit besonderen Anforderungen	180
6	Zusammenfassung und Ausblick	183
7	Schrifttum	185
	Tabellenverzeichnis	195
	Abbildungsverzeichnis	198
	Anhang	204
	Anhang A 1: Die ETB-Richtlinie in Baden-Württemberg.....	204
	Anhang A 2: Laufgeschwindigkeiten des Menschen.....	206
	Anhang A 3: Energien infolge des Doppelreifen-Prüfkörpers	207
	Anhang A 4: Berechnungsergebnisse des linearen Zweimassenschwingermodells.....	208
	Anhang A 5: Parameterstudien zum Pendelschlagversuch mit dem linearen Zweimassenschwingermodell berechnete Kräfte	212
	Anhang A 6: Maximaler Anteil der Trägheitskräfte - mit dem linearen Zweimassenschwingermodell berechnete Kräfte	213

Anhang A 7: Vergleich von FE – Simulationsergebnissen mit dem Ausgang von Pendelschlagversuchen nach den TRAV	214
Anhang A 8: Ergebnisse des linearen Zweimassenschwingermodells	216
Stoßkörper und Prüfkörper mit gleicher Masse und Steifigkeit	216
Gleiche Massen, doppelte Pendelsteifigkeit	217
Gleiche Massen, halbe Stoßkörpersteifigkeit	218
Geringere Glasmassen, gleiche Steifigkeit	219
Größere Glasmasse, gleiche Steifigkeit	220
Anhang A 9: Hinsichtlich Glasbruch ausgewertete Pendelschlagversuche	221
Verbund-Sicherheitsgläser	221
Mehrscheiben-Isolierverglasungen	223
Anhang A 10: Anforderungen an eine Absturzsicherung	224
Geometrische Randbedingungen	224
Eingeführte technische Baubestimmungen	224
Anhang A 11: Kontrollen am ausgeführten Bauwerk	226
Anhang A 12: Variationskoeffizient von Glas	227
Anhang A 13: Umfrage bei neun Prüfern von Prüfstellen, die insgesamt ca. 1.800 Pendelschlagversuche durchgeführt haben	229
Anhang A 14: LS-DYNA Eingabedatensätze	233
Pendel	233
Glastafel	237
Anhang A 15: Berechnungsbeispiele	241
A 15.1 Starre Wand	241
A 15.2 Glastafel 8 x 1.050 x 2.056	242
A 15.3 Glastafel 2 x 5 x 1.000 x 2.000	244
A 15.4 Glastafel 10 x 1.500 x 3.000	246
A 15.5 Glastafel 12 x 3.200 x 6.000	248
A 15.6 Glastafel 8 x 4.000 x 2.000 allseitig gelagert	249
A 15.7 Glastafel 8 x 2.000 x 1.000 zweiseitig gelagert	250
A 15.8 Vergleich zwischen Berechnungsergebnissen des linearen Zweimassenschwingermodells und SJ MEPLA	252
Danksagung	253
Stichwortverzeichnis	254
Lebenslauf	255

Abkürzungen, Bezeichnungen und Werkstoffkennwerte

Abkürzungen

Tabelle 1: Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
abP	Allgemeines b auaufsichtliches P rüfzeugnis
DIBt	D eutsches I nstitut für B autechnik, Berlin
ESG	Thermisch vorgespanntes Glas; wird baurechtlich als E inscheiben- S icherheitsglas bezeichnet
ETB	E inheitliche T echnische B aubestimmung
FE (FEM)	F inite E lemente (F inite – E lemente – M ethode)
GABl	G emeinsames A mts b latt Baden – Württemberg
LTB	L iste der t echnischen B aubestimmungen [LTB]
MBO	M uster b auordnung
MSI	M ehrscheiben- I solierglas
PVB	P olyvinyl- B utyrat
SPG	Kalknatronglas, das im Float-Verfahren (Floatglas) hergestellt wurde; baurechtlich als S piegelglas bezeichnet
TRAV	T echnische R egeln für die Verwendung a bsturzsichernder V erglasungen
TRLV	T echnische R egeln für die Verwendung l iniengelagerter V erglasungen
TVG	T eil v orgespanntes G las
UEAtc	U nion e uropéenne pour l'agrément dans la c onstruction
VSG	V erbund- S icherheitsglas mit einer Zwischenfolie aus PVB

Bezeichnungen

Tabelle 2: Einheiten

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
$A_{P\text{stoß}}$	Kontaktfläche des Stoßkörpers beim Anprall	[mm ²]
$A_{S_{kx}}$	x-Koordinate des Auftrefforts des Stoßkörpers	[mm]
$A_{S_{ky}}$	y-Koordinate des Auftrefforts des Stoßkörpers	[mm]
a_{sk}	Beschleunigung des Stoßkörpers	[m/s ²]
a	Höhe des Prüfkörpers (Glastafel)	[mm]
b	Breite des Prüfkörpers (Glastafel)	[mm]
b_L	Breite des Linienlagers	[mm]
c_M	Steifigkeit ¹ des Menschen an der Stoßstelle	[N/mm]
c_{sk}	Steifigkeit ¹ des Stoßkörpers (Pendel)	[N/mm]
c_{pk}	Steifigkeit ¹ der Glastafel unmittelbar vor dem Stoß (Prüfkörper)	[N/mm]
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	[kJ/kg K]
C_v	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	[kJ/kg K]
E	Elastizitätsmodul bei quasistatischer Einwirkung	[N/mm ²]
E_{Basis}	Wichtigster repräsentativer (charakteristischer) Wert der Energie, die beim Anprall eines Menschen auf ein Bauteil übertragen wird, „...von dem angenommen wird, dass er mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit im Bezugszeitraum unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer des Tragwerks und der entsprechenden Bemessungssituation nicht überschritten oder unterschritten wird ...“ [DIN 1055-100]	[Nmm]
E_{dyn}	Dynamischer Elastizitätsmodul von Glas unter Stößeinwirkung	[N/mm ²]
E_{elast}	Im Bauteil elastisch gespeicherte Energie	[Nmm]
$E_{d,aG}^2$	Bemessungswert der einwirkenden Prüfenergie (Erforderliche Prüfenergie für absturzhemmende Glastafeln)	[Nm]
E_{kin}	Kinetische Energie	[Nmm]
E_{k0}	Kinetische Energie unmittelbar vor dem Anprall des Stoßkörpers	[Nmm]
E_{rot}	Rotationsenergie	[Nmm]

¹ Die (nichtlineare) Last-Verformungscharakteristik des Stoß- oder Prüfkörpers wird hier als Steifigkeit (Federsteifigkeit) bezeichnet. Sie ist ein Maß für die elastische Verformbarkeit des Elementes.

E_{pot}	Potentielle Energie	[Nmm]
E_{Versuch}	Vorschlag der Prüfenergie nach [UEAtc 82]	[Nm]
F	Einzelkraft an der Stelle des Auftreffortes	[N]
$F_{\text{Pstoß}}$	Kraft im Stoßkörper bei Anprall	[N]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
Gl	Gleitmodul der elastischen Zwischenlage im Linienlager	[N/mm ²]
h	Fallhöhe	[mm]
h_G	Höhe der Glastafel	[mm]
h_L	Höhe des Linienlagers	[mm]
J_0	Massenträgheitsmoment	[kgmm ²]
K	Fraktilfaktor	[-]
K_{pk}	Anfangsbiegesteifigkeit des Prüfkörpers unter Einzellast am Auftreffort des Stoßkörpers	[Nm]
l	Spannweite	[mm]
l_L	Länge des Linienlagers	[mm]
l_{ps}	Abstand des Aufhängepunkts vom Stoßkörperschwerpunkt	[mm]
m_{pk}	Gesamtmasse des Prüfkörpers (Glastafel)	[kg]
m_{WM}	wirksame Masse des stoßenden Menschen (ca. 60 % der Eigenmasse des Menschen)	[kg]
m_{gpk}	generalisierte Masse der angestoßenen Glastafel	[kg]
m_{mpk}	wirksame ⁷ Masse der angestoßenen Glastafel	[kg]
m_M	Masse Mensch	[kg]
m_{sk}	Masse des Stoßkörpers (Pendel)	[kg]
m_{SM}	Schwabbelmasse (Organe, Blut, Fett etc.) des Menschen	[kg]
p_f	Wahrscheinlichkeit des Überschreitens des Grenzzustands	[-]
p_h	Holmlast (Verkehrslast)	[kN/m]
sh	Shore Härte	[-]
q	Formfaktor des elastischen Linienlagers	[-]
t	Dicke des Prüfkörpers (Glasdicke)	[mm]
T	Schwingungsdauer	[s]
v_{a0}	Anprallgeschwindigkeit	[m/s]
v_M	Laufgeschwindigkeit des Menschen	[m/s]

v_{sk}	Geschwindigkeit des Stoßkörpers	[m/s]
v_{pk}	Geschwindigkeit des Prüfkörpers (Glastafel)	[m/s]
w_0	Einheitsverschiebung an der Stelle der Maximalverformung	[mm]
w_{sk}	Zusammendrückung des Stoßkörpers (Reifen/Mensch)	[mm]
w_{pk}	Verformung der Glastafel unter Stoßeinwirkung	[mm]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[m/s]
Δl	Spannweitenverkürzung	[mm]
E_D	Druckmodul der elastischen Zwischenschichten	[N/mm ²]
Θ	Faktor zur Berücksichtigung zeitveränderlicher Werkstoffeigenschaften	[-]
α	Energieübertragungsfaktor beim Pendelschlagversuch; Berücksichtigt das Verhältnis der vom Stoßkörper abgegebenen zu der vom Menschen auf das Bauteil übertragenen Energie.	[-]
α'	Energieübertragungsfaktor bei quasistatischen Versuchen	[-]
β	Sicherheitsindex nach [GRUSIBA 81]	[-]
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkungen	[-]
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert des Werkstoffs (berücksichtigt Streuungen von Werkstoff und Herstellungsqualität)	[-]
v	Variationskoeffizient	[-]
ρ	Rohdichte	[kg/m ³]
σ_1	Hauptzugspannung	[N/mm ²]
σ_3	Hauptdruckspannung	[N/mm ²]
$\sigma_{R,k,Glas}^2$	Charakteristischer Wert der Biegezugspannung von Glas (Widerstandsgröße, Glas [SPG, TVG, ESG])	[N/mm ²]
$\sigma_{R,k,Glas,Stoß}^2$	Charakteristischer Wert der Biegezugspannung von Glas unter Stoßeinwirkung	[N/mm ²]
$\sigma_{R,d,Glas,Stoß}$	Bemessungswert der Biegezugspannung von Glas unter Stoßeinwirkung als Widerstandsgröße	[N/mm ²]

² Im konstruktiven Glasbau ist das Teilsicherheitskonzept mit den zugehörigen Begriffen bisher nicht umgesetzt. Erste Ansätze finden sich in der Entwurfsfassung der DIN 18008, Stand 2004. Sie setzt voraus: „...dass in den einschlägigen Produktnormen der Mindestwert der charakteristischen Biegezugfestigkeit (5% Fraktil bei 95% Aussagewahrscheinlichkeit) und ggf. das typische Bruchbild für Scheiben in Bauteilgröße...“ beschrieben ist. In den technischen Spezifikationen finden sich viele uneinheitliche Begriffe für die „zulässigen“ Spannungen, Biegespannung, Biegezugspannung, Biegezugfestigkeit usw. Der Index k steht nach DIN 1055-100 für den charakteristischen Wert. Die Wahl des restlichen Index dient hier zur Kennzeichnung der Einwirkungsart.

Werkstoffkennwerte

Tabelle 3: Werkstoffkennwerte

Werkstoffkennwert	Einheit	SPG	TVG	ESG
Dichte ρ	[kg/m ³]	2.500	2.500	2.500
Elastizitätsmodul E (quasistatisch nach [DIN 1249-10])	[N/mm ²]	70.000 – 73.000	70.000	70.000
Querdehnzahl ν	[-]	0,23	0,23	0,23
Zulässige Spannungen nach [TRLV 98]	[N/mm ²]	45	70	120
„... Zulässige Biegespannungen ...“ nach [TRAV 03], Abschnitt 6.4.4	[N/mm ²]	80	120	170
Widerstandgröße der charakteristischen Biegezugfestigkeit von Glas unter Stoßeinwirkung		$\sigma_{R,k,SPG,Sto\beta}$	$\sigma_{R,k,TVG,Sto\beta}$	$\sigma_{R,k,ESG,Sto\beta}$

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Seit langer Zeit werden Glasscheiben in Fensterrahmen eingebaut. Auf der Basis handwerklicher Regeln und Erfahrungen werden Fenster rein konstruktiv ausgeführt. In der modernen Architektur hat sich in den vergangenen Jahren ein Wandel zur transparenten Bauweise mit raumabschließenden Ganzglaskonstruktionen entwickelt. Daraus ergibt sich die Erfordernis, Glastafeln³ als raumhohe Fassadenelemente oder in Pfosten-Riegel-Konstruktionen für den möglichen Anprall eines Menschen auszulegen. Die Ursachen eines Menschenanpralls können Stolpern, Unaufmerksamkeit beim Gehen und Laufen sowie unkontrolliertes Fallen sein. Je nach Einbausituation können die zu bemessenden Glastafeln unterschiedlichsten Stoßcharakteristika ausgesetzt sein. Dennoch werden die Beanspruchungen auf Treppenläufen, in Sportstadien, in Bürogebäuden, in Wohnungen, bei Fluchtwegen, in oder quer zur Laufrichtung bei der Beurteilung der Tragsicherheit im Lastfall „Anprall“ bisher nicht unterschieden. Bis zum Jahr 2003, in dem die technischen Regeln für die Verwendung absturzsichernder Verglasungen eingeführt wurden, war der Nachweis der Absturzsicherung nicht geregelt. Heute werden absturzsichernde Glastafeln einheitlich nach den TRAV bemessen. Dieses Regelwerk führt dazu, dass absturzsichernde Glastafeln heute oft dickwandiger ausgeführt werden als früher. Diese Entwicklung führt zu höheren Kosten und wirft die Frage auf, ob die geforderten Bauteildicken in jedem Fall erforderlich sind.

Der hier vorgestellte rechnerische Bemessungsvorschlag ermöglicht eine Optimierung der Glasdicke bei Einhaltung des üblichen Sicherheitsniveaus.

Die Anforderung an ein absturzhemmendes⁴ Bauteil besteht darin, dass ein anprallender Mensch zurückgehalten wird. Eventuell entstehende Splitter oder Bruchstücke dürfen auch andere Personen nicht gefährden. Welchen Beanspruchungen der Mensch selbst ausgesetzt ist

³ In der Umgangssprache wird die Glasfüllung eines Fensters als Glasscheibe bezeichnet. Die am Bau Beteiligten verwenden diese Bezeichnung im konstruktiven Glasbau für alle Arten von eingebauten Glastafeln, unabhängig von der Art der Einwirkung, Lagerung oder Funktion. Mechanisch gesehen wird eine Ausfachung in Wirklichkeit in Ihre Ebene als Scheibe wirken. Windeinwirkung und Stoß beanspruchen die Glasfüllung jedoch als Platte. So sind Glasscheibe oder Glasplatte jeweils mit einer definierten Tragwirkung verknüpft. In dieser Arbeit wird deshalb einheitlich von **Glastafel** gesprochen. Die Tragwirkung (Scheibe oder Platte) wird, wo erforderlich, zusätzlich erwähnt.

⁴ Bei Glasbauteilen hat sich baurechtlich der Begriff **absturzsichernde Verglasung** durchgesetzt. Die vorliegende Arbeit setzt sich über diesen baurechtlichen Begriff hinweg und dokumentiert den Stand der Wissenschaft (state of the art). Missverständnisse werden durch die Vermeidung üblicher aber nicht eindeutiger Begriffe verhindert. Bei Konstruktionen, die einen Einbruch oder einen Durchschuss verhindern sollen, wird in den Normen von einbruchhemmend oder schusshemmend gesprochen. In der vorliegenden Arbeit wird das Ziel, Menschen vor dem Absturz zurückzuhalten, mit dem Begriff **absturzhemmende Glastafel** ausgedrückt.

und welche Verletzungsrisiken bei unterschiedlichen Anprallsituationen bestehen, ist bisher weitgehend unbekannt. Auch hierauf wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingegangen.



Bild 1.1: Durch Anprall beanspruchte Glastafel im Versagenszustand

Foto: C. Keller

Gegenstand der Untersuchungen sind liniengelagerte monolithische Glastafeln und Verbund-Sicherheitsglastafeln⁵. Aufbauten mit monolithischen Glastafeln entsprechen allerdings nicht den Vorgaben der gegenwärtig üblichen baurechtlichen Forderungen für absturzsichernde Verglasungen, da mindestens eine Verbund-Sicherheitsglastafel verwendet werden muss. Der Verfasser distanziert sich von der Verwendung von absturzhemmenden monolithischen ESG-Tafeln. Dennoch werden in der vorliegenden Arbeit monolithische Glastafeln als Hilfsmittel zur Kalibrierung der FE – Berechnungen genutzt.

⁵ Im konstruktiven Glasbau werden Begriffe benutzt, die eine **Sicherheit** (Einscheiben-Sicherheitsglas, absturzsichernde Verglasungen) vortäuschen. Diese Begriffe werden hier, wenn sie sich nicht direkt auf eine Vorschrift beziehen, vermieden. Dennoch gilt: „Eine absturzhemmende Konstruktion hält dem Anprall eines Menschen stand“. Ausnahmeszenarien wie Terrorismus, Vandalismus oder in Selbstmordabsicht werden nicht untersucht.

In der vorliegenden Arbeit ist das Anprallereignis von Stoßkörpern auf Glastafeln systematisch untersucht worden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird ein rechnerisches Bemessungskonzept zur Beurteilung der Tragfähigkeit von Glastafeln unter dem Anprall eines Menschen vorgeschlagen.

1.2 Problemstellung

In verschiedenen europäischen und außereuropäischen Nationen und selbst innerhalb der Bundesrepublik Deutschland gelten - je nach anzuwendendem Rechtsbereich, Baurecht oder Arbeitsrecht - für den Menschenanprall unterschiedliche Anforderungen zum Nachweise einer ausreichenden Tragfähigkeit von Bauteilen.

Seit 1985 wird im Baurecht die Tragfähigkeit einer Glastafel für den Lastfall Menschenanprall auf der Basis von Pendelschlagversuchen beurteilt (Bild 1.2 rechte Seite). Die Simulation des Anpralls durch einen Pendelschlagversuch ist eine starke Vereinfachung des realen Vorgangs. Mit dem Versuch erhält man für den geprüften Einzelfall ein „Ja-/Nein-Ergebnis“: Die Glastafel ist ausreichend dimensioniert bzw. sie hat versagt. Grundsätzlich ist diese Vorgehensweise unbefriedigend. Sie erinnert an die Anfänge statischer Berechnungen. Die Tragfähigkeit eines Bauwerks wurde mit Probelastungen anstelle statischer Berechnungen nachgewiesen. Zudem sind Pendelschlagversuche kostspielig und aufwändig. Seit 1995 besteht der Stoßkörper für den Pendelschlagversuch aus zwei miteinander verschraubten und mit Zusatzmassen ballastierten Reifen. Er ist über eine Stange, ein Seil oder eine Kette am Aufhängepunkt (Drehpunkt) befestigt (Bild 2.7). In der Pendeltieflage schlägt der Stoßkörper horizontal auf die zu prüfende Glastafel. Beim Auslenken des Stoßkörpers wird der Schwerpunkt angehoben. Das vertikale Maß der Auslenkung definiert die Fallhöhe. Das Baurecht fordert unterschiedliche Fallhöhen zur Beurteilung absturzsichernder Verglasungen ausschließlich nach dem Kriterium ob die Glastafel zur „... Abtragung von Horizontallasten in Holmhöhe...“ [TRAV 03] auszulegen ist. So gilt zu unterscheiden, ob die Verglasung raumhoch ohne tragenden Holm oder füllend hinter oder unter tragfähigen Querriegeln eingebaut wird. Die anzusetzenden Fallhöhen beinhaltet einen pauschalen Sicherheitszuschlag, der streuende Einflüsse wie Werkstofffestigkeiten, Montageungenauigkeiten, statistische Unschärfen (Probenzahl), örtliche Gegebenheiten, Höhe der zu erwartenden Einwirkung etc. abdeckt. Der Versuch gilt als „bestanden“, wenn nach dem Anprall kein Versagen oder nur geringfügige Schäden an der Konstruktion festzustellen sind. Aussagen über das tatsächlich vorhandene Sicherheitsniveau sind damit jedoch nicht möglich.

In [Wö 00a] wurde das prinzipielle Vorgehen und die Größe der beim Pendelschlagversuch anzusetzenden Einwirkung hinterfragt. Dennoch müssen absturzsichernde Verglasungen derzeit weiterhin mit dem beschriebenen Pendelschlagversuch geprüft werden.

Prinzipiell lässt sich der Pendelschlagversuch auf eine absturzhemmende Glastafel rechnerisch simulieren (Bild 1.2 links unten). Die Güte des Berechnungsergebnisses hängt von der Modellgenauigkeit und von der Wahl der Eingabeparameter ab. Die Vielzahl der in FE – Programmen erforderlichen Eingabeparameter zur Beschreibung des Stoßvorgangs und die

damit verbundenen Fehlermöglichkeiten, beeinflussen die Genauigkeit des Berechnungsergebnisses. Bislang wurde nicht schlüssig nachgewiesen, dass eine nichtlineare FE – Simulation das Problem hinreichend genau abbilden kann. Deshalb wird diese Variante des Nachweises noch nicht von allen Bauaufsichten der Bundesländer anerkannt.

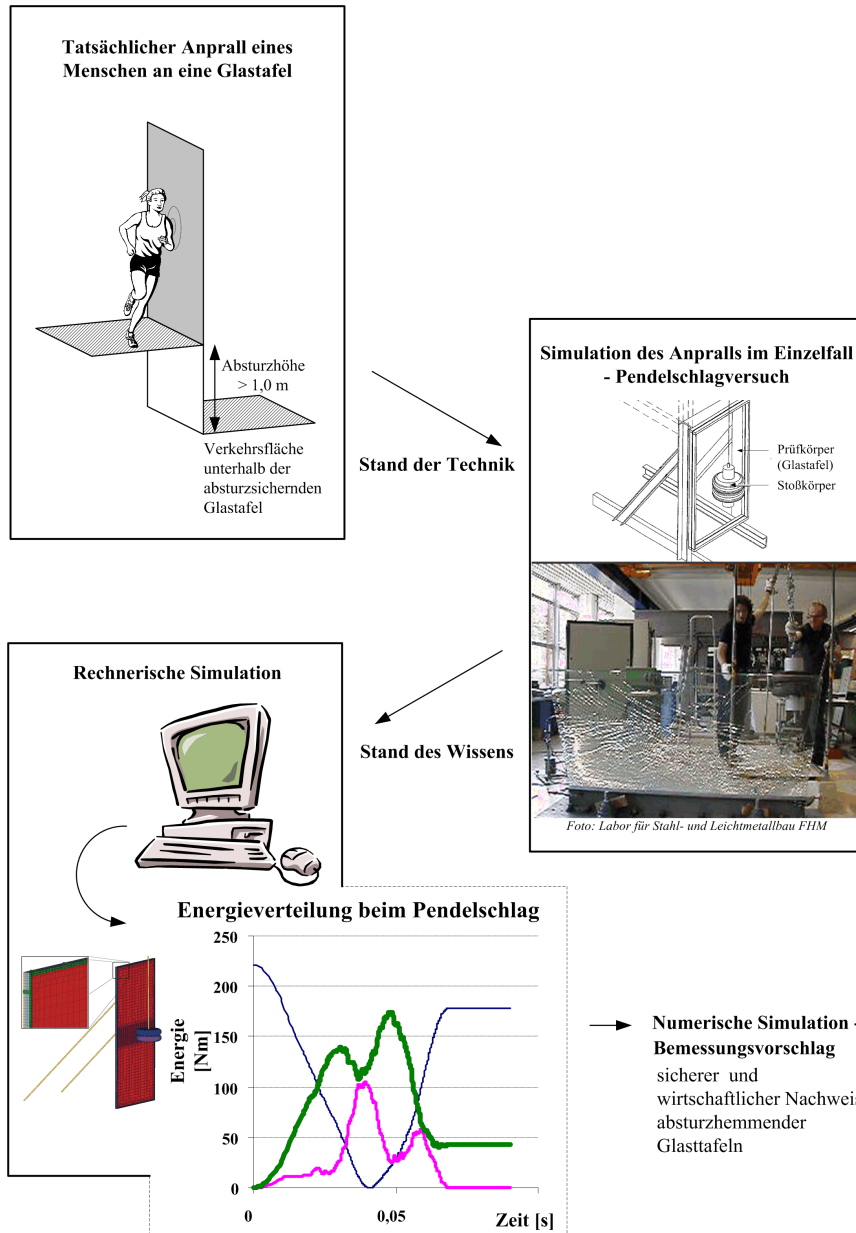


Bild 1.2: Problemstellung - Stand der Technik – Ergebnis der vorliegenden Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die derzeit vorhandenen Berechnungsmöglichkeiten zum Nachweis des Lastfalls „Menschenanprall“ analysiert und systematisch angewendet. Damit wachsen das Verständnis und der Überblick über die Parameter, die das Stoßereignis beeinflussen. Erstmals werden alle erforderlichen Referenzlösungen zur Überprüfung von FE – Simulationen des Pendelschlagversuches nach DIN EN 12600 zusammengestellt. Beim Vergleich der eigenen Berechnungsergebnisse mit den hier dargestellten verifizierten Werten lassen sich Fehler bei der Simulation des Anpralls des Stoßkörpers auf Glastafeln erkennen.

Im Weiteren wird gezeigt, dass mit der rechnerischen Simulation nicht nur der Pendelschlagversuch selbst berechnet werden kann. Das Stoßereignis kann auch wirklichkeitsnäher mit realistischen Menschengleichmännern (Dummys) als Stoßkörper nachgebildet werden. Mit diesem Hilfsmittel lassen sich der Stoßverlauf und das Tragverhalten der Glastafel untersuchen.

Die Berechnungsergebnisse lassen sich hinsichtlich der auf die Glastafel übertragenen Energiemenge auswerten. Ein neues rechnerisches Bemessungskonzept zum Nachweis der Tragfähigkeit einer absturzhemmenden Glastafel wird vorgestellt (Bild 1.2 unten), das in der Simulation eine definierte Energiemenge fordert, die in die Glastafel eingetragen wurde.

Die vorliegende Arbeit soll zudem die obersten Baurechtsbehörden der Länder zum Überdenken ihrer Haltung gegenüber rechnerischen Nachweisen zur Beurteilung der absturzhemmenden Wirkung von Glastafeln anregen. So können insbesondere Situationen z. B. beim Einbau nur weniger Glastafeln auch rechnerisch sichere und deutlich kostengünstige Nachweise geführt werden.

1.3 Vorgehensweise und Gliederung

Prallt ein Mensch gegen eine Glastafel, so ist er etwa 100 Millisekunden mit dieser in Kontakt. Zahlreiche Faktoren beeinflussen den Stoßverlauf. Diese werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht. Hierzu werden zahlreiche Veröffentlichungen ausgewertet, sowie Detailfragen anhand von Ergebnissen eigener und fremder Bauteilversuche beantwortet. Auf der Grundlage dieser Daten werden geeignete FE – Modelle validiert und deren Berechnungsergebnisse vorgestellt. Damit kann der Stoßvorgang des Pendelschlagversuchs realitätsnah abgebildet werden. Weiter werden Parameterstudien durchgeführt und mit den Versuchsergebnissen abgeglichen. Schließlich wird eine allgemeingültige rechnerische Lösung entwickelt, mit der allseitig gelagerte absturzhemmende Glastafeln für den Lastfall „Menschenanprall“ wirtschaftlich dimensioniert werden können.

Zum Verständnis des Anprallvorgangs werden zunächst folgende Punkte bearbeitet:

- Darstellung der baurechtlichen Anforderungen und der mechanischen Auswirkungen des Anprallereignisses eines Körpers auf eine Glastafel.
- Simulationen des Pendelschlagversuchs mit Ersatz- und FE – Modellen zur Analyse der Energieübertragungsmechanismen aus dem Stoßkörper in den Prüfkörper.
- Vorgaben für eine wirklichkeitsnahe rechnerische Simulation des Anpralls eines Stoßkörpers auf eine Glastafel.
- Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Messwerten aus Pendelschlagversuchen

Aufbauend auf dem Nachweis, dass die durchgeführten FE – Berechnungen den Anprall von Stoßkörpern auf Glastafeln wirklichkeitsnah rechnerisch abbilden, wird ein schlüssiger Bemessungsvorschlag zur Bemessung absturzhemmender Glastafeln erarbeitet.

- Aufbauend auf dem Teilsicherheitskonzept berücksichtigt der Bemessungsvorschlag den Stand der Technik.
- Bestätigt wird das Konzept mit der rechnerischen Verifikation des Bemessungsvorschlags anhand von Menschengleichnissen (Dummys).

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit sind die bestehenden baurechtlichen Grundlagen dargestellt und die mechanischen Hintergründe des Stoßvorgangs – der Stoßpartner Mensch oder Stoßkörper⁶ gegen Glastafel – werden zum Verständnis aufbereitet. Die UEAtc-Leitlinie „Stöße auf undurchsichtige, senkrechte Bauteile“, [UEAtc 82] sind anerkannte Regeln der Technik. Die hiernach anzusetzende Einwirkung zur Simulation eines Menschenanpralls wird hier auf den Werkstoff Glas erweitert und den geforderten Einwirkungen gegenübergestellt.

Basierend auf den Ergebnissen wird im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit gezeigt, wie ein qualifiziertes FE – Modell zur Simulation aufgebaut sein muss. Zuerst wird die Eignung der Stoßkörpermodellierung beim Anprall auf die starre Wand mit Messdaten z. B. aus [Sc 01] belegt. Werden zudem die Nachgiebigkeiten und das Schwingungsverhalten beliebiger Verglasungen berücksichtigt, wird der Stoßvorgang komplexer. Zur Überprüfung der FE – Simulation werden Vergleichsergebnisse aus eigenen Messreihen mit Versuchen auf monolithische Glastafeln [Bu 04b] und Isolierglastafeln [Rü 02a] vorgestellt. Am monolithischen Glas werden die Effekte während des Stoßes, ohne Störeinflüsse aus dem Verbundverhalten, aufgezeigt. Nach dem Stoß verändern sich infolge der unharmonischen Schwingungen der Glastafel die in eine Normalenrichtung der Platte wirksame⁷ Masse und deren Steifigkeit. So ergibt sich je nach Auftreffort und Eigenschaften der Stoß- und Prüfkörper ein charakteristischer Schwingungsverlauf der Glastafel.

Ein geeignetes FE – Modell simuliert diesen Ablauf. Es wird anhand von Bauteilversuchsergebnissen geprüft, kalibriert und anhand von weiteren Messwerten validiert. Es simuliert den Stoßverlauf des baurechtlich geforderten Pendelschlagversuches mit dem anprallenden Stoßkörper nach DIN EN 12600 realitätsnah. Damit ist nachgewiesen, dass der Pendelschlag gegen Glastafeln rechnerisch realitätsnah simuliert werden kann. Zukünftig könnten aufwändige experimentelle Untersuchungen durch entsprechende Berechnungen ersetzt werden. Hiermit ergeben sich wirtschaftliche Vorteile und die Versuchstechnik kann sich auf Detailfragen, z. B. die Bestimmung der charakteristischen Werkstoffeigenschaften, konzentrieren. Mit den vorgestellten Benchmarkergebnissen können Ingenieure ihre eigenen Simulationsmodelle überprüfen.

⁶ Stoßkörper nach Bild 2.7

⁷ Ein anprallender Stoßkörper regt eine Glastafel mit einer breitbandigen Frequenz zum Schwingen an, sie schwingt in ihren Eigenformen. In der Literatur wird häufig von mitschwingender oder generalisierter Masse gesprochen. Bei jeder Eigenform schwingt die gesamte Masse mit, so ist der Begriff „mitschwingend“ nicht ideal. Bei einer Systemidealisierung des Prüfkörpers zu einem Einmassenschwinger, der eine energieäquivalente Schwingung ausführt, wird die Glastafelmasse als generalisierte Masse idealisiert. Bei den im Glasbau üblichen Tafelgeometrien wechseln mehrere Eigenformen während des Schwingvorgangs. Teilbereiche der Glastafel können gegenphasig schwingen. Damit schwingt nicht immer die Gesamtmasse wirksam mit, über die Anpralldauer ergibt sich eine nichtlineare Massenverteilung in Schwingungsrichtung.

Der zu Beginn der vorliegenden Arbeit versuchte Ansatz, mit linearen Ersatzmodellen das tatsächliche Schwingungsverhalten anzunähern, konnte nicht umgesetzt werden. Die untersuchten Zwei- oder Dreimassenschwingermodelle können das Problem nicht hinreichend beschreiben. Die erarbeiteten Ersatzlasttafeln im Anhang Tabellen A 5.1 und A 6.1 dienen nur zum prinzipiellen Verständnis. Wirtschaftliche und sichere Bemessungen sind damit nicht möglich.

Aufbauend auf der Erkenntnis, dass ein validiertes FE – Modell den Stoßvorgang realitätsnah beschreibt, löst sich der Bemessungsvorschlag von den baurechtlichen Vorgaben der Fallhöhe und verwendet die Rechentechnik lediglich zur Simulation des Kontaktes zwischen Glastafel und Stoßkörper (Mensch). Der eigentliche Nachweis erfolgt über die auf die Glastafel übertragene Energie. Ein weiterer Vorteil der Berechnung ist, dass mechanische Beanspruchungen wie Pendelreaktionskräfte, Auflagerkräfte, Spannungszustände etc. berechnet werden können. In Parameterstudien wurde der Einfluss verschiedener Faktoren wie der Lagerung, des Glasaufbaus, der Dichte usw. untersucht. Bei allen Berechnungen wurde das Werkstoffverhalten von Glas als linear elastisch vorausgesetzt. Das Resttragverhalten von gebrochenem VSG bleibt unberücksichtigt und stellt eine weitere Sicherheitsreserve dar. Bisher veröffentlichte Ansätze zur Simulation der Resttragfähigkeit einer gebrochenen Glastafel in [Ng 04] oder [So 04] zielten auf die Abbildung der Reststeifigkeit im Bruchzustand ab. Ein wirklichkeitsnahes FE – Modell, mit dem das Rissverhalten von Glas und damit der Rissfortschritt rechnerisch und netzunabhängig simuliert werden kann, ist noch nicht entwickelt. So lässt sich auch das vorhandene Resttragvermögen einer brechenden VSG-Einheit im Moment nicht rechnerisch nachweisen. Mit den Hilfsmitteln der Bruchmechanik kann das Bruchverhalten und die theoretische Biegefestigkeit von Glas unter kurzzeitigen Stoßeinwirkungen abgeschätzt werden. Bisher sind allerdings keine Versuche unter den beim Menschenanprall auftretenden hohen Dehnraten bekannt, mit denen der kritische Spannungsintensitätsfaktor und der Geometriefaktor für die Belastungsart und verschiedene Rissgeometrien beim Werkstoff Glas bestimmt worden wäre.

Trotz der Kalibrierung der FE – Berechnungsmodelle an statischen Belastungsversuchen, die in [Bu 04] dokumentiert sind, stimmten die Berechnungsergebnisse damit abgeglicherer Modelle bei der Simulation des Pendelschlagversuches nicht mit den dynamischen Messwerten überein. Diese unerwarteten Abweichungen zwischen Versuchswerten und den Berechnungsergebnissen wurden in einer weiteren systematischen Versuchsreihe zur Klärung eines möglichen Lagereinflusses untersucht. Die Ergebnisse der hierzu durchgeführten Versuche sind in [Bu 04a] dokumentiert. Auf Basis dieser Untersuchungen konnte mit der rechnerischen Simulation erstmals ein dehnratenabhängiges Werkstoffverhalten bzw. ein dynamischer Elastizitätsmodul von Glas unter Pendelschlageinwirkung ermittelt werden.

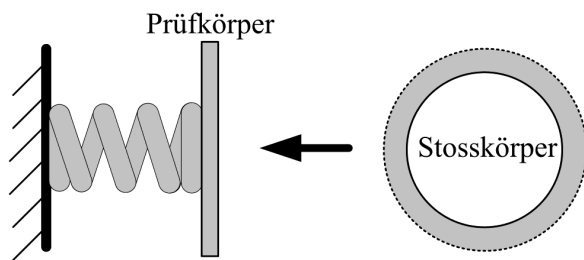


Bild 1.3: Allgemeines Ersatzmodell zum Anprall eines Stoßkörpers

Der Pendelschlagversuch bildet das Verhalten eines Menschen beim Anprall auf eine Konstruktion nach: „... im Prinzip soll dabei das Aufprallen eines Menschen auf das Bauteil simuliert werden ...“ [Fe 96]. Bild 1.3 zeigt ein einfaches statisches Ersatzmodell des Anpralls. Der Prüfkörper wird als Masse, dessen Steifigkeit und die der Unterkonstruktion, werden als lineare

Feder idealisiert. Der Stoßkörper könnte zusätzlich auch ein lineares oder nichtlineares Steifigkeitsverhalten aufweisen. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob der Stoßkörper nach DIN EN 12600 bezogen auf den Menschen ein realistisches Verhalten aufweist. Dazu wurden Steifigkeitsangaben aus unterschiedlichen Arbeiten ([Bo 99][Rü 02a][Sc 01][St 76]) in einem Diagramm zusammengefasst (Bild 5.5). Daraus ist ersichtlich, dass die Steifigkeit der Schulter eines Menschen deutlich von der Steifigkeit des Stoßkörpers nach DIN EN 12600 abweicht. Deshalb ergeben sich unterschiedliche Einwirkungscharakteristiken beim Anprall eines Stoßkörpers oder eines Menschen. Mit einem geeigneteren Stoßkörper (ES2-Dummy) wird die beim Menschenanprall auf die Glastafel übertragene Energiemenge abgeschätzt. Diese Berechnungen dienen zur Überprüfung der baurechtlich geforderten Energie, die zum Nachweis absturzsichernder Bauteile aus anderen Werkstoffen anzusetzen ist.

Der Autor erwartet von akkreditierten Prüfstellen, dass deren Laborversuche reproduziert werden können. Streuen Messwerte bei Wiederholung des nominal gleichen Versuchs, wurde der Wiederholungsversuch unsorgfältig, d. h. mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt oder ungeeignete Stoßkörper (plastische Verformungen) wurden verwendet. Würde man auf zwei Glastafeln jeweils einen ideal gleichen Pendelschlagversuch ausführen, das bedeutet die Randbedingungen wie Werkstoffverhalten, Abmessungen, Fallhöhe, Auftreffort, keine Auslöseverzögerung des Stoßkörpers etc. sind gleich, so wären die Systemantworten der Glastafeln identisch. Tatsächlich streuen aber die Ergebnisse von Versuchen in Situ (siehe auch Anhang A 13, Bild A13). Werkstoffstreuungen sind herstellungsbedingt und lassen sich kaum beeinflussen, treten jedoch darüber hinausgehende Abweichungen auf, wurden die Randbedingungen nicht sauber eingehalten. In einer Simulation lässt sich der Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen in Parameterstudien studieren. Darüber hinaus kann der Stoßablauf in der Berechnung hinsichtlich vieler Fragestellungen ausgewertet werden. Eine Glastafel schwingt nach dem Anprall in charakteristischer Weise, abhängig von den Glastafelabmessungen, deren Lagerung und dem Auftreffort sowie den Eigenschaften des Stoßkörpers. So wird unterschiedlich viel Energie vom Stoßkörper auf die Glastafel übertragen. Im Versuch kann der Energieanteil, der als elastische Verformung des Stoßkörpers gespeichert wird, in der Regel nicht bestimmt werden. Jeder experimentelle Pendelschlag prüft eine individuelle Anprallsituation, obwohl eigentlich immer dasselbe Szenario eines anprallenden Menschen abgebildet werden sollte. Aussagen über die tatsächlich vorhandene Sicherheit sind nicht möglich.

Die auf die Glastafel einwirkende Energie lässt sich in der rechnerischen Simulation auswerten; die für absturzsichernde Konstruktionen erforderliche charakteristische Energie, die beim Anprall eines Menschen auf ein absturzsicherndes Bauteil einwirkt, ist in der UEAtc-Leitlinie festgelegt. Diese Energieaufnahme dient bei „leichten“ Glastafeln (Abgrenzung siehe Kapitel 4.3.4) zum Nachweis der Tragfähigkeit beim Menschenanprall.

Würde man für alle Bauteile eine einheitliche übertragene Stoßenergie als Nachweisgrundlage fordern, müsste mit Zunahme der Bauteilsteifigkeit und des Bauteilgewichtes die einwirkende Energie beim Stoß gesteigert werden, da in steife und schwere⁸ Bauteile aufgrund deren Trägheit weniger Energie eingetragen wird als bei nachgiebigen, leichten⁸ Systemen. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit für große schwere Glastafeln eine definierte Stoßkörperkraft als alternatives Kriterium zum Nachweis der Absturzhemmung vorgeschlagen. Die Randbedingungen und die Eigenschaften einer Glastafel, für die keine weitere rechnerische Untersuchung erforderlich ist, werden erarbeitet und vorgestellt. Wird bei der numerischen Analyse diese Kraft überschritten, stellt die Trägheitskraft der Glastafel im Kräftegleichgewicht zwischen Stoß- und Prüfkörper den Hauptanteil gegenüber der einwirkenden Stoßkörperkraft dar. Die Kraftkomponente infolge der Glastafelverschiebung ist so gering, dass sie aus baupraktischer Sicht vernachlässigt werden kann. Die Trägheitskraft wirkt dem jeweils anprallenden Stoßkörper entgegen und so können auf dieser Grundlage auch bei großen Glastafeln mit rechnerischen Nachweisen wirtschaftliche und sichere absturzhemmende Glastafeln nachgewiesen werden. Die hier vorgestellten Studien sind zusätzlich durch Erfahrungen aus über 300 ausgewerteten Ergebnissen von Pendelschlagversuchen gestützt. Sie belegen, dass „schwere“ Konstruktionen aufgrund ihrer Trägheit absturzhemmend sind und damit der Stoß nicht weiter rechnerisch untersucht werden muss.

Das erarbeitete Nachweiskonzept basiert auf dem Bemessungswert der einwirkenden Energie $E_{d,aG}$. Er setzt sich aus charakteristischen Anteilen infolge eines auf ein Bauteil prallenden Menschen, sowie den Zuschlägen für Werkstoff- und Montagestreuungen zusammen. Die absturzhemmende Wirkung einer beliebigen Glastafel lässt sich damit je nach Einbausituation unter Zugrundelegung einer definierten und einheitlichen Sicherheit nachweisen.

Die Höhe der einwirkenden charakteristischen Energie E_{Basis} gilt allgemein für den Nachweis von absturzsichernden Bauteilen. Sie wird gemäß dem Stand der Technik als Grundlage für das Bemessungskonzept gewählt. In dieser Arbeit wird zusätzlich noch überprüft, ob dieser Wert tatsächlich ausreichend ist. Dazu wurden Messdaten von Versuchen mit Menschen, die gegen Glastafeln prallten, ausgewertet. Unfallstatistiken wurden durchsucht vor dem Hintergrund „an Glas verletzten Menschen“. Der Ansatz Verletzungsrisiken infolge des Anpralls über biomechanische Grenzwerte zu quantifizieren, musste aufgrund der geringen Anlaufgeschwindigkeit verworfen werden. Mit dem Hilfsmittel aus dem Automobilbau - Dummys als Menschenmodell bei Crashtestsimulationen – wurde die auf eine Glastafel übertragene Ener-

⁸ Die Begriffe „leichte“ oder „schwere“ Glastafel dienen in dieser Arbeit als Abgrenzung der Tragmechanismen beim Anprall. Bei schweren Glastafeln wirkt die Trägheitskraft als maßgeblicher Anteil gegen die Stoßkörperkraft (siehe Abschnitt 4.3.4).

gie berechnet. Neben dem Anprallszenario infolge „üblicher“ Nutzung werden Extremsituationen mit hoher Anprallgeschwindigkeit einer Person z. B. auf Inline – Skatern oder einem Skateboard beurteilt. Rechnerische Untersuchungen mit Dummys bestätigen, den gewählten Bemessungswert der einwirkenden Energie $E_{d,aG}$ für das Konzept dieser Arbeit als ausreichend.

Aufbauend auf Kapitel 1 zeigt die vorliegende Arbeit in Kapitel 2 die baurechtlichen Vorgaben und mechanischen Zusammenhänge des Anprallereignisses eines Körpers auf Glastafeln.

In Kapitel 3 werden Kriterien erarbeitet und vorgestellt, wie eine qualifizierte rechnerische FE – Simulation des Pendelschlagversuches aufgebaut sein muss. Hierzu wurde eine Vielzahl von bisher unkoordinierten Versuchsdaten rechnerisch so ausgewertet, dass störende Einflüsse wie Prüfrahmendeformationen etc. eliminiert wurden. Zur praxistauglichen Anwendung wurden für einige Systemantworten (Weg – Zeit – Verläufe) von Glastafeln unter Stoßeinwirkung Trendkurven berechnet. Damit stehen Benchmarks für FE – Berechnungen d. h. einfach zu handhabende Kontrolldaten zur Verfügung.

Unter Verwendung von zwei unterschiedlichen FE – Programmen wird in Kapitel 4 ein neuer Bemessungsvorschlag zum rechnerischen Nachweis einer absturzhemmenden Glastafel entwickelt.

Mit dem Kapitel 5 wird das Bemessungskonzept anhand einer Simulation mit einem Dummy bestätigt. Es wird überprüft ob der Pendelschlagversuch den Menschenanprall auf Glastafeln realitätsnah nachbildet. Die Folgen für den Menschen werden bewertet.

Kapitel 6 enthält eine Diskussion der Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

2 Stand der Technik

2.1 Allgemeines

Glasfassaden müssen statischen, bauphysikalischen und optischen Anforderungen gerecht werden. Raumabschließend und geschosshoch verbaute Glastafeln müssen – einschließlich der Unterkonstruktion – einem möglichen Menschenanprall standhalten. Die Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung wird derzeit mit recht aufwändigen Bauteilversuchen nachgewiesen, da bisher kein schlüssiges, allgemeingültiges und prüffähiges Rechenverfahren vorgestellt wurde.

2.2 Baurechtliche Anforderungen an eine absturzsichernde Konstruktion

2.2.1 Sicherheitsbedürfnis

Bauprodukte dürfen in Deutschland nur verbaut werden, wenn sie ausreichend sicher sind. Dies ist nach Auffassung der Bauaufsicht gewährleistet, falls die Anforderungen nach [GRUSIBA 81] oder [DIBt 86] eingehalten sind. Wirtschaftliche Konstruktionen entstehen auf der Grundlage der probabilistischen Sicherheitstheorie im Bauwesen, die eine vertretbar geringe Versagenswahrscheinlichkeit garantiert. Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit auf den rechnerischen Nachweis absturzhemmender Glastafeln übertragen. Die [GRUSIBA 81] gestattet, dass für eine neue Bauart die Erfahrungen der Ingenieure aus der Baupraxis genutzt werden (Baysche Wahrscheinlichkeitstheorie). So lassen sich schon mit weniger Versuchen oder Berechnungen sichere Bewertungen treffen. Zusätzlich ist der Stand der Technik für diese Bauart zu berücksichtigen. Auch rechnerische Nachweise von absturzhemmenden Glasbauteilen erfüllen das geforderte Sicherheitsniveau für Bauwerke [Ma 00], wenn folgendermaßen vorgegangen wird:

- Die baurechtlichen Anforderungen an eine absturzsichernde Konstruktion bestimmen die Einwirkungsszenarien.
- Vor diesem Hintergrund lassen sich die charakteristischen Einwirkungen ermitteln.
- Beim Nachweis werden charakteristische Werkstoffeigenschaften verwendet.
- Konstruktionen werden mit Bemessungswerten nachgewiesen:
 - Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkung werden bauprodukt- und bauartübergreifend festgelegt.
 - Die Materialsicherheitsbeiwerte zielen auf ein einheitliches Sicherheitsniveau.

- Eine neue Bauart kann mit bestehenden Erfahrungen der Baupraxis an das übliche Sicherheitsniveau angepasst werden.
- Die Sicherheit wird an der Wahrscheinlichkeit gemessen, mit der der betrachtete Grenzzustand (Versagen) erreicht wird.
- Der Grenzzustand ist erreicht, wenn eine Glastafel (von einer Person oder einem Gegenstand) durchschlagen wird, bei Splitterabgang auf Verkehrsflächen (Bild 2.1) oder bei Totalversagen von Konstruktionsteilen. Bei der rechnerischen Simulation einer absturzhemmenden Glastafel entspricht dies einem Überschreiten der zulässigen Biegezugspannung (Glasbruch).



Bild 2.1: Momentaufnahme beim Anprall des Stoßkörpers, Glassplitter würden auf darunter liegende Verkehrsflächen fallen
Foto: Labor für Stahl- und Leichtmetallbau FHM

Die oben beschriebene Vorgehensweise wird für einen Bemessungsvorschlag der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegt.

2.2.2 Bauprodukte und Bauarten

In Deutschland ist das Bauen hoheitliches Recht und wird von jedem Bundesland eigenverantwortlich geregelt. Grundlage ist die jeweilige Landesbauordnung. Die Landesbauordnungen basieren auf der einheitlichen Musterbauordnung. Sie weichen jedoch in Einzelheiten voneinander ab. Werden die baurechtlichen Vorschriften eingehalten, entstehen bauliche Anlagen, welche die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben und Gesundheit nicht gefährden (§ 3 Abs. 1 [MBO 02]). Erbringen die Baubeteiligten die geforderten Nachweise und werden die Vorgaben bei der baulichen Umsetzung eingehalten, sind die genannten Schutzziele erfüllt. Das Bauordnungsrecht unterscheidet zwischen *Verwendbarkeitsnachwei-*

sen für Bauprodukte, *Anwendbarkeitsnachweisen* für Bauarten und *Übereinstimmungsnachweisen* zur Bestätigung der Übereinstimmung mit den technischen Vorschriften. Es ist definiert, dass Bauprodukte *verwendet* und Bauarten *angewendet* werden [Ku 04], [Ma 03].

Nach § 2 Abs. 9 und § 10 der MBO sind Bauprodukte definitionsgemäß „Baustoffe, Bauteile und Anlagen, die hergestellt werden, um dauerhaft in baulichen Anlagen eingebaut zu werden“ oder „... vorgefertigte Anlagen, die hergestellt werden, um mit dem Erdboden verbunden zu werden ...“. Diese dürfen nur verwendet werden, wenn sie nicht wesentlich von den technischen Regeln abweichen, die in der Bauregelliste A Teil 1 [BRL] aufgeführt sind. Mit dem Übereinstimmungszeichen „Ü-Zeichen“ wird ein geregeltes Bauprodukt gekennzeichnet. Werden Bauprodukte verwendet, die von den technischen Regeln wesentlich abweichen oder gar Bauprodukte, für die es keine technischen Regeln gibt (ungeregelte Bauprodukte), muss der Verwendbarkeitsnachweis in anderer Form erbracht werden. Möglich ist eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis einer anerkannten Prüfstelle oder eine Zustimmung im Einzelfall.

Die MBO kennt neben den Bauprodukten den Begriff der Bauart. Als Bauarten versteht man das „... Zusammenfügen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen oder Teilen von baulichen Anlagen ...“ [MBO 02]. Werden genormte Bauprodukte zusammengefügt, können weitere Anforderungen relevant werden. Am Beispiel einer liniengelagerten Überkopfverglasung, die aus Verbundglas, Verbund-Sicherheitsglas, Stahlprofilen, Sechskantschrauben und weiteren geregelten Bauprodukten zusammengefügt sein kann, wird das Schema verständlich. Bei der Bauart „Überkopfverglasung“ müssen Fragen der Bemessung oder der Resttragfähigkeit bei Glasbruch zusätzlich geregelt sein. Diese Anforderungen werden für Bauarten nicht in der Bauregelliste sondern in der Liste der technischen Baubestimmungen geregelt. Jedes Bundesland hat eine eigene LTB. Mit der Veröffentlichung der entsprechenden Vorschrift in der LTB wird sie zur „geregelten Bauart“.

Bei wesentlichen Abweichungen von den Normen gibt es als Anwendbarkeitsnachweis wieder die oben genannten drei Wege: Zulassung, Prüfzeugnis oder Zustimmung im Einzelfall.

Wenn die Bauart keine erheblichen Anforderungen an die Sicherheit der baulichen Anlage erfüllen muss oder die Bauart nach einem anerkannten Prüfverfahren beurteilt werden kann, genügt das abP einer anerkannten Stelle als Anwendbarkeitsnachweis. Ein Beispiel ist das Prüfzeugnis, das die „Technischen Regeln für die Verwendung absturzsichernder Verglasungen“ [TRAV 03] zum Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung fordern. Liegt das abP für das Bauvorhaben vor, ist gewährleistet, dass die oben genannten Schutzziele der öffentlichen Sicherheit und Ordnung eingehalten werden.

2.2.3 Zustimmung im Einzelfall

Wie geht der Anwender vor, wenn neuartige Baustoffe oder Bauarten im Einzelfall eingesetzt werden sollen? Jeder muss darauf vertrauen können, dass innovative Bauprodukte und Bauarten die gleiche Sicherheit bieten wie herkömmliche, bewährte und über technische Vorschriften geregelte Bauverfahren. Dies ist über eine *allgemeine baurechtliche Zulassung* oder eine

Zustimmung im Einzelfall nachzuweisen. Die Rechtsgrundlage für eine ZiE bieten die jeweiligen Landesbauordnungen. Eine Zustimmung kann von der obersten Bauaufsichtsbehörde eines Bundeslandes erteilt werden, wenn das übliche Sicherheitsniveau eingehalten wird. Ursprünglich wurde Glas am Bau nur als Ausfachung in Fenstern verwendet. In der Funktion als Absturzsicherung wurde der Einsatz des spröden Bauprodukts jedoch lange als unvertretbares Sicherheitsrisiko angesehen. Vor der Bekanntmachung der TRAV im Jahr 2003 waren absturzsichernde Verglasungen als nicht geregelte Bauart einzustufen. Deshalb war eine Zustimmung im Einzelfall für diese Anwendung erforderlich. Da dieser Sachverhalt nicht jedem Planer klar war, sind bis dahin zahlreiche absturzsichernde Konstruktionen eingebaut worden, die den aktuellen Regeln nicht gerecht werden: die Glasaufbauten sind zu dünn oder es wurde auf die Verwendung von Verbund-Sicherheitsglas verzichtet. Bei der Bauaufsicht selbst herrschte Unsicherheit. Das nach GRUSIBAU festgelegte Sicherheitsniveau im Bauwesen wurde im Zustimmungsverfahren und beim Erarbeiten der TRAV nicht konsequent beachtet.

Seit die TRAV in die Bauregelliste bzw. die Liste der technischen Baubestimmungen aufgenommen ist, dürfen absturzsichernde Glastafeln auf dieser Basis beurteilt werden. Die Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung kann mit Pendelschlagversuchen nachgewiesen werden. Diese darf nur eine akkreditierte Prüfstelle durchführen. Das Ergebnis wird in einem allgemeinen baurechtlichen Prüfzeugnis dokumentiert. Eine Zustimmung im Einzelfall wird dann nicht mehr benötigt.

Weitere baurechtliche Anforderungen an eine Absturzsicherung, die nicht direkt mit dem Sicherheitsgedanken in Verbindung stehen, können dem Anhang A 10: Anforderungen an eine Absturzsicherung - entnommen werden. Aufgrund der großen Anzahl von Anfragen bezüglich absturzsichernder Verglasungen hat die Landesstelle für Bautechnik Baden-Württemberg Merkblätter [LfB 03] als kleine technische Ratgeber veröffentlicht.

2.3 Regeln der Technik

2.3.1 Allgemeines

Im nachfolgenden Kapitel werden bestehende Regelwerke vorgestellt, mit denen absturzsichernde Bauteile nachgewiesen werden. Ein zusammenfassender Überblick ist in Tabelle 2.3 enthalten. Die unterschiedlichen Anforderungen werden hier einheitlich auf die Energie des Stoßkörpers, unmittelbar vor dem Anprall, bezogen.

Im Glasbau wird die Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung mit dem Pendelschlagversuch geprüft. Die zum Verständnis der weiteren Arbeit erforderlichen Begriffe und Hintergründe werden dargestellt.

Neben der Einwirkung sind für ein schlüssiges Bemessungskonzept auch die Festigkeit und der Elastizitätsmodul des Werkstoffs Glas unter stoßartiger Einwirkung zu ermitteln. Aus den Ergebnissen verschiedener Vierpunktbiegeversuche wurde für diese Arbeit jeweils die Streu-

ung der Festigkeitseigenschaften von Glas berücksichtigt. Auf dieser Grundlage werden die Teilsicherheitsbeiwerte für den Bauteilwiderstand festgelegt.

2.3.2 UEAtc-Leitlinie – „Stöße auf undurchsichtige, senkrechte Bauteile“

2.3.2.1 Allgemeines

Baurechtlich ist die UEAtc-Leitlinie [UEAtc 82] nicht eingeführt, legt aber als anerkannte Regel der Technik die Grundanforderungen an Absturzsicherungen fest. Diese Leitlinie stellt für absturzsichernde Bauprodukte oder Bauarten eine einheitliche europäische Beurteilungsgrundlage dar, auf der die werkstoffspezifischen Normen aufbauen sollen. „... Derartige Richtlinien stellen damit einen bedeutenden Beitrag zum Abbau technischer Handelshemmnisse in Europa dar ...“ [UEAtc 82]. Vergleicht man die nationalen Vorgehensweisen in den verschiedenen europäischen Ländern (Kapitel 2.3.6), so wurden die Ziele der Leitlinie leider nicht verwirklicht.

Als die Leitlinie 1982 erarbeitet wurde, waren die Tragfähigkeit und das Verhalten von Glas unter Stoßbeanspruchung noch nicht untersucht. Aufgrund vieler Schäden an Verglasungen - aus welchen Gründen auch immer - mangelte es an Vertrauen in die Tragsicherheit des Werkstoffs Glas. Mit der UEAtc-Leitlinie sollte deshalb keine absturzsichernden Verglasungen beurteilt werden. Denn schon im Titel sind transparente Baustoffe und damit Glas ausgenommen. Bezüglich der Nichtanwendbarkeit auf Glas sind keine weiteren Einschränkungen enthalten. Die Einschränkung auf undurchsichtige Bauteile führt jedoch dazu, dass undurchsichtige Konstruktionen aus eingefärbtem Glas oder mit transluzenter Folie ebenfalls beurteilt werden dürften.

Die UEAtc-Leitlinie nennt allgemeingültig die Grundsatzanforderungen der Regeln zum Nachweis absturzsichernde Bauteile. Damit wird bei absturzsichernden Konstruktionen aus verschiedenen Werkstoffen ein einheitliches Sicherheitsniveau erreicht. Energieübertragungsfaktoren wurden aus Versuchsergebnissen für verschiedene Massen- und Steifigkeitsverhältnisse der Stoß- und Prüfkörper erarbeitet. Auf dieser Grundlage lassen sich Absturzsicherungen beurteilen, wie dies z. B. in der ETB – Richtlinie (siehe Abschnitt 2.3.3) umgesetzt worden ist. Nach der ETB-Richtlinie werden seit nahezu zwanzig Jahren absturzsichernde Konstruktionen ausgelegt, oft sogar aus Glas obwohl dies nicht dem Geltungsbereich der Richtlinie entspricht. Vorzeitiges Versagen von Bauteilen, die den Anforderungen dieser Vorschrift genügen, ist bisher nicht bekannt geworden.

Bei Glasplatten üblicher Größe haben streuende Versuchsrandbedingungen wie z. B. die Steifigkeit des Stoßkörpers einen großen Einfluss auf den Stoßübertragungsfaktor. Deshalb konnten keine allgemeingültigen Stoßübertragungsfaktoren für Glasbauteile bestimmt werden. Nutzt man die rechnerische Simulation mit reproduzierbaren Randbedingungen, kann mit diesem Hilfsmittel der auf die Glastafel übertragene Energieanteil berechnet werden. Obwohl dies ein anderes Konzept ist als damals, kann nach Meinung des Autors, auf der Basis des heutigen Kenntnisstands über den Werkstoff Glas die charakteristische Einwirkung aus der UEAtc-Leitlinie zum Nachweis absturzsichernder Bauteile auch auf absturzhemmende Glas-

tafeln übertragen werden. Die erforderlichen Zuschläge infolge der möglichen Werkstofffestigkeitsstreuung von Glas werden erarbeitet und müssen berücksichtigt werden.

2.3.2.2 Wirkung von Stößen

Die UEAtc-Leitlinie unterscheidet drei Auswirkungen, die ein Stoß hervorrufen kann:

- Ein Stoß kann die Gesamtkonstruktion oder einzelne Bauteile (Glastafel, Befestigungen etc.) schädigen. Die maßgebende Einwirkung ist in der Regel ein weicher Stoß.
- Es können nur örtlich begrenzte Wirkungen am Auftreffort entstehen (lokales Splittern infolge des harten Stoßes).
- Eventuell kann ein Stoß Schäden mit kombinierten Auswirkungen hervorrufen.

2.3.2.3 Szenarien

Es müssen nur „konventionelle Stöße“ berücksichtigt werden, die bei üblicher Nutzung entstehen können. Extremsituationen wie Vandalismus etc. müssen bei der Dimensionierung nicht berücksichtigt werden. Im Allgemeinen muss nur bis in Höhen von 1,5 m über dem Fußbodenniveau mit einem Anprall von Menschen gerechnet werden.

2.3.2.4 Klassifizierung konventioneller Stöße

In der Leitlinie werden Sicherheits- und Gebrauchsstöße unterschieden.

„Sicherheitsstöße“ stellen die heftigsten Stoßeinwirkungen dar, denen ein Bauteil bei Menschenanprall während der Nutzungsdauer ausgesetzt sein kann. Menschenleben dürfen auch während des Anpralls nicht gefährdet werden. Beim Sicherheitsstoß darf das Bauteil nicht versagen. Es wird angenommen, dass 2 %⁹ aller Bauteile eines Typs während ihrer Nutzungsdauer jeweils einem Sicherheitsstoß ausgesetzt sind.

Streuungen der Größe der Einwirkungen brauchen nicht weiter berücksichtigt werden, da der Zahlenwert E_{Basis} als realistische obere Grenze für die Anprallenergie bei Stößen eines menschlichen Körpers gegen vertikale Bauteile angesehen werden kann [UEAtc 82].

Unvermeidliche „Rempler“ und Anschläge mit Gegenständen an Bauteile werden als „Gebrauchsstöße“ bezeichnet. Dabei sollen das Erscheinungsbild der Konstruktion und die bauphysikalischen Eigenschaften während der vorgesehenen Lebensdauer erhalten bleiben. 5 %⁹ aller Bauteile werden während ihrer Lebensdauer durch einen Gebrauchstauglichkeitsstoß beansprucht.

2.3.2.5 Sicherheitsstöße

Die Bauteilprüfungen gelten als bestanden, wenn nach den Stößen folgende Kriterien erfüllt sind:

- Bauteile dürfen nicht vom Stoßkörper durchstoßen werden.

⁹ Der statistische Hintergrund (Probenumfang etc.), der zu dieser Aussage führt, ist nicht dokumentiert.

- Bauteile dürfen nicht aus dem Rahmen gerissen werden.
- Es dürfen keine stumpfen oder schneidenden Scherben oder Elemente herabfallen, die Menschen ernsthaft verletzen können (in und entgegen der Schlagrichtung).
- Die tragende Funktion der Gesamtkonstruktion darf nicht beeinträchtigt sein.

2.3.2.6 Stoßeinwirkung beim Bauteilversuch

Übersteht ein Bauteil eine Stoßprüfung mit der Basisenergie und den erforderlichen Zuschlägen für streuende Werkstoffeigenschaften und Herstellungsungenauigkeiten, so ist es als geeignet und ausreichend stoßhemmend einzustufen. Wegen der Reibung zwischen Stoßkörper (Reifen) und Prüfkörper (Glastafel), der elastischen Verformung des Stoßkörpers und der Versuchsunterkonstruktion wird nicht die gesamte kinetische Energie des Stoßkörpers auf das angestoßene Bauteil übertragen. Damit beim Prüfen mindestens die Basisenergie mit den Zuschlägen in den Prüfkörper eingetragen wird, sollen die Versuche mit einer gesteigerten Energie E_{Versuch} nach Gleichung (2.1) erfolgen [UEAtc 82] Abschnitt 3.41.

$$E_{\text{Versuch}} = \alpha \cdot \gamma_M \cdot \Theta \cdot E_{\text{Basis}} \quad (2.1)$$

Hierin ist:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
E_{Versuch}	Vorschlag der Prüfenergie nach [UEAtc 82]	[Nm]
α	Energieübertragungsfaktor beim Pendelschlagversuch; berücksichtigt das Verhältnis der vom Stoßkörper abgegebenen zu der vom Menschen auf das Bauteil übertragenen Energie.	[-]
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert des Werkstoffs (berücksichtigt Streuungen von Werkstoff und Herstellungsqualität)	[-]
Θ	Faktor zur Berücksichtigung zeitveränderlicher Werkstoffeigenschaften	[-]
E_{Basis}	Wichtigster repräsentativer (charakteristischer) Wert der Energie, die beim Anprall eines Menschen auf ein Bauteil übertragen wird, „...von dem angenommen wird, dass er mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit im Bezugszeitraum unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer des Tragwerks und der entsprechenden Bemessungssituation nicht überschritten oder unterschritten wird ...“ [DIN 1055-100]	[Nmm]

2.3.2.7 Streuung der Versuchsbedingungen und der Werkstoffeigenschaften

In der Leitlinie werden die Variationskoeffizienten v_1 der Werkstofffestigkeit und v_2 der Herstellqualität unterschieden. Größere Streuungen der Werkstoffeigenschaften oder Fertigungsqualität werden mit einer höheren Versuchsenergie kompensiert. Hierdurch soll die

geforderte Mindestsicherheit garantiert werden. Für Sicherheitsstöße gilt Tabelle 2.1, für Gebrauchsstöße sind die Faktoren nach Tabelle 2.2 anzusetzen.

Tabelle 2.1: γ_M -Teilsicherheitsfaktoren beim „Sicherheitsstoß“, Werte nach [UEAtc 82]

	γ_M : Sicherheitsstoß	Streuung der Versuchsrandbedingungen und der Werkstoffeigenschaften v_1			
		gering (< 7,5 %)	< 15,0 %	< 30,0 %	stark (< 45%)
Streuung der Herstellungsbedingungen v_2	Überwachte Herstellung „Vier Augen Prinzip“ (< 7,5%)	1,03	1,48	2,07	2,93
	Konventionelle Herstellung (< 22,5%)	1,74	1,89	2,45	3,34

Tabelle 2.2 : γ_M -Teilsicherheitsfaktoren beim „Gebrauchsstoß“, Werte nach [UEAtc 82]

	γ_M : Gebrauchsstoß	Streuung der Versuchsrandbedingungen und der Werkstoffeigenschaften v_1			
		gering (< 7,5 %)	< 15,0 %	< 30,0 %	stark (< 45%)
Streuung der Herstellungsbedingungen v_2	Überwachte Herstellung „Vier Augen Prinzip“ (< 7,5%)	1,01	1,01	1,05	1,10
	Konventionelle Herstellung (< 22,5%)	1,03	1,04	1,07	1,12

2.3.3 ETB-Richtlinie „Bauteile, die gegen Absturz sichern“

2.3.3.1 Allgemeines

In [St 67] und [St 76] sind Versuche der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) auf „... leichte Bauelemente ...“ dokumentiert. Menschen ließen sich mit der Schulter gegen Wandabschnitte aus Gipskartonplatten oder gemauerten Wandabschnitten fallen. Die Versuchskonstruktionen hatten Massen zwischen 12,5 kg und 315 kg bei Breiten von 1,25 m bis 2,66 m und 3,0 m Höhe. Die Versuchsauswertungen belegen, dass stoßartige (dynamische) Beanspruchungen nicht ausreichend realistisch mit einer statischen Ersatzlast abgebildet werden können. Absturzsicherungen lassen sich jedoch wesentlich einfacher mit statischen Lasten nachweisen, zumal dies dem gewohnten Konzept der DIN 1055 entspricht. Die Planer idealisieren die auf ein Bauwerk wirkenden komplexen Lasten, wie Windböen, sich bewegende Personen usw. üblicherweise als statische Ersatzlasten. Selbst bei Brücken wird rollender Verkehr im Tragsicherheitsnachweis nur als statische Einwirkung angesetzt. Das dynamische Verhalten wird durch einen Lasterhöhungsfaktor berücksichtigt, mit dem die statischen Lasten zu multiplizierenden sind. Beim Nachweis des Menschenanpralls auf beliebige absturzhemmende Bauteile (massive Betonbrüstungen oder dünne Metallbleche usw.) würde ein Nachweis mit einer statischen Ersatzlast allerdings in vielen Fällen zu unwirtschaftlichen Konstruktionen führen. Deshalb wurde in der ETB ein Konzept gewählt, bei dem stoßartige Bean-

spruchungen des Bauteils durch einwirkende Energien beschrieben werden [Es 82]. Dieses Vorgehen entspricht dem Ansatz der UEAtc-Leitlinie.

In [St 76] Abschnitt 1.1 wurde bereits auf Bauteile hingewiesen, „... die vorwiegend aus sprödbrechendem Material wie Glas bestehen und nach eingeleiteten örtlichen Zerstörungen insgesamt zersplittern können. Dagegen kann ein Bauteil bei stoßartiger Belastung auch insgesamt versagen...“. Eine Aussage, wie absturzhemmende Verglasungen zu dimensionieren sind, erfolgte nicht. In [St 82] Abschnitt 2.2 ist ebenfalls die Anforderung enthalten, dass beim Nachweis der „stoßartigen Belastung“ ein Gesamtversagen des Bauteils, eine lokale Zerstörung am Auftreffort oder eine Kombination aus beiden Versagensarten zu unterscheiden sind.

An der Materialprüfanstalt in Darmstadt wurden 1980 Glasbauteile mit Pendelschlagversuchen geprüft [Ba 80], wobei der Stoßkörper aus einem bleischrotgefüllten Ledersack bestand. Ziel war es, Energieübertragungsfaktoren α zu bestimmen, mit dem bei unterschiedlichen Geometrien der jeweilige Energieanteil ermittelt werden kann, der vom Stoßkörper auf den Prüfkörper übertragen wird. Die Versuchsergebnisse streuten stark, und konnten nicht mit befriedigender Übereinstimmung wiederholt werden. Auf Basis der erhaltenen Ergebnisse ließen sich keine Stoßübertragungsfaktoren für Glasbauteile zum rechnerischen Nachweis bestimmen. Gründe für die stark streuenden Ergebnisse wurden nicht veröffentlicht. Glas wurde als Baustoff für Absturzsicherungen ausgeschlossen. In [Ba 80] ist auf absturzsichernde Verglasungen verwiesen, die seit ca. 1950 eingebaut werden. Obwohl es sich damals um unregelmäßige Bauarten handelte, wurden die Tragfähigkeiten nicht mit einer abZ oder einer Zustimmung im Einzelfall beurteilt. Vermutlich aus Unkenntnis über mögliche Folgen und die technischen Zusammenhänge sind die unteren Baurechtsbehörden bei entsprechenden Bauvorhaben häufig nicht eingeschritten. So wurden in Deutschland zahlreiche absturzsichernde Verglasungen gebaut, bei denen die Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung in Frage gestellt werden muss (siehe Bild 2.2).



Bild 2.2: Für Kinder gefährliche absturzsichernde Glasbrüstung aus ESG, ungeschützte Glaskante und eine ungestützte Ecke
Foto: U. Brendler

Eine absturzsichernde Konstruktion kann nach der ETB-Richtlinie mit einem „vereinfachten Nachweis“ der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung beurteilt werden: „... Für Bauteile, die aus Erfahrung ausreichend sicher beurteilt werden können, braucht ein Nachweis der Stoßsicherheit nach Abschnitt 3.2 dieser Richtlinie nicht geführt zu werden. ...“ [ETB 87] Abschnitt 1. Hier sind sicherlich nicht Konstruktionen heranzuziehen, die nie einem Stoßeignis ausgesetzt waren.

Am Beispiel des Bundeslandes Baden-Württemberg wird die Situation exemplarisch im Anhang A 1 dargestellt. Entwicklungen im konstruktiven Glasbau und damit verbundene Erfahrungen führten dazu, dass die Beurteilungsgrundlagen für Zustimmungen im Einzelfall mehrfach geändert wurden.

Einen besonderen Stellenwert hat das Verbund-Sicherheitsglas bei absturzsichernden Verglasungen erlangt. Aufgrund der splitterbindenden Wirkung ist das Verletzungsrisiko an scharfen Glaskanten auch im gebrochenen Zustand gering. Zusätzlich besitzt die gebrochene Glastafel über den Verbund der Zwischenfolie eine gewisse Resttragfähigkeit. Im Falle eines Scheibensbruchs, z. B. infolge eines Schlags mit einem Spielzeugauto auf die Glaskante, würde die ESG-Brüstung in Bild 2.2 vollständig versagen. Bestände die Brüstung aus VSG, wäre der Raumschluss auch nach dem Splintern weiterhin vorhanden (siehe Bild 2.3). Das Bauprodukt VSG wurde aus dem Automobilbau übernommen. Hier sollte der Kopf des Fahrers bei einem Unfall mit Anprall an die Frontscheibe möglichst sanft abgefangen werden. So sollte das Glas lokal um den Aufprallort möglichst weich werden. Die Haftfähigkeit der PVB-Folie am Glas ist so eingestellt, dass sich die Folie örtlich begrenzt unter der Stoßstelle ablöst, damit die PVB-Folie gedehnt werden kann. Der weitere Verbund muss jedoch erhalten bleiben, damit sich die gebrochene Frontscheibe über ihre Reststeifigkeit in der Lagerung hält. Damit wird die Glastafel lokal weicher und der Aufschlag eines unangeschnallten Menschen auf die Frontscheibe wird gedämpft. Nachdem die Gurtpflicht 1976 eingeführt war, bestand keine Nachfrage mehr an entsprechende Eigenschaften der Folien. Vor dem Hintergrund des Sicherheitsgedankens wurden PVB-Folien seither nicht mehr wesentlich weiterentwickelt. Im Bauwesen dürfen Verbund-Sicherheitsglastafeln verwendet werden, falls die PVB-Folien den Anforderungen der Bauregelliste [BRL] genügen. Bei geeigneter Lagerung können damit erfahrungsgemäß robuste Konstruktionen gebaut werden, die im Schadensfall eine Resttragfähigkeit aufweisen. Erfahrungsgemäß sind die Glasbruchstücke so stark im Verbund gehalten, dass daran das Verletzungsrisiko für den Menschen klein ist.

Die wichtigste Grundlage für die Erarbeitung der Nachweise zur Beurteilung von Bauteilen unter Stößeinwirkung waren für den Normenausschuss „Bauwesen im Deutschen Institut für Normung“ Versuche mit anprallenden Menschen, dokumentiert in [St 76]. Aufbauend darauf wurde die ETB-Richtlinie entwickelt, die 1982 vom Institut für Bautechnik als Entwurfsfassung der ETB-Richtlinie „Bauteile, die gegen Absturz sichern“, veröffentlicht [IfBt 82] wurde. Diese Richtlinie wurde zunächst nicht bauaufsichtlich eingeführt und hatte nicht den Stellenwert einer Norm. Sie war jedoch eine Regel der Technik, die von der einschlägigen Fachwelt hätte beachtet werden müssen. Da sie baurechtlich nicht eingeführt wurde, waren die unteren Bauaufsichtsbehörden nicht verpflichtet, die Anforderungen dieser Richtlinie in

den Baugenehmigungsverfahren zu fordern. 1985 wurde die endgültige Fassung in den Bekanntmachungen der technischen Baubestimmungen (Vorläufer der Musterliste der Technischen Baubestimmung) veröffentlicht und die ETB-Richtlinie damit bauaufsichtlich eingeführt.

Die ETB-Richtlinie wurde jedoch auch daraufhin nicht in allen Bundesländern zeitgleich und in gleicher Form umgesetzt. Einige Bundesländer haben den Baustoff Glas für den Nachweis nach ETB-Richtlinie ausgeschlossen. Dies begründet sich zum Teil aus der dogmatischen Haltung der Bauaufsicht, die bei der Entstehung der Richtlinie im Jahr 1985 das Risiko, von einer zerbrochenen Glastafel verletzt zu werden, als „lebensgefährlich“ einstufte. Aussagekräftige Unfallstatistiken, die diese Haltung rechtfertigen, sind nicht bekannt. Aus heutiger Sicht ist der damalige Umgang mit dem Thema nicht nachzuvollziehen. Von der Bauaufsicht wurde das Risiko, sich an gebrochenen Glasbauteilen zu verletzen, gleich eingestuft wie z. B. von einem herunterfallenden Blumentopf getroffen zu werden. Wissenschaftliche Untersuchungen die dieses Risiko quantifizieren sind unbekannt.



Bild 2.3: Verbund-Sicherheitsglastafel nach einem Anprall, Raumabschluss bleibt gewahrt

2.3.3.2 Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung

Die Stoßsicherheit einer Konstruktion lässt sich mit der ETB-Richtlinie über drei Alternativen nachweisen:

- „... Für Bauteile die aus Erfahrung ausreichend sicher beurteilt werden können, braucht ein Nachweis der Stoßbelastung nach Abschnitt 3.2 dieser Richtlinie nicht geführt zu werden ...“ [ETB 87]. Aus Unkenntnis werden heute weiterhin nicht ausreichend dimensionierte Konstruktionen über diese „vermeintliche“ Nachweisform beurteilt.
- Rechnerischer Nachweis über ausreichende Widerstandsenergie. Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass eine Linearisierung der Beziehung zwischen der Höhe einer Einzelast und der daraus resultierenden Durchbiegung des Bauteils im Hinblick auf die Größe seiner Widerstandsenergie auf der sicheren Seite liegt. Dies gilt für Werkstoffe mit bekannten Spannungs-Dehnungslinien. Falls die Spannungs-Dehnungslinien für Baustoffe jedoch unbekannt sind oder ein wirklichkeitsnahes Verhalten ermittelt werden soll, können Biegeversuche an Werkstoffproben durchgeführt werden.
- Mit Versuche von einer Materialprüfungsanstalt an mindestens drei Probekörpern.

Rechnerisch darf der weiche Stoß vereinfachend als quasistatischer Lastfall zur Beurteilung des Verhaltens des gesamten

Bauteils mit einer übertragenen Energie von mindestens 100 Nm angesetzt werden. Der beim gedachten Stoß in das Bauteil übertragene Energieanteil wird durch das Arbeitsvermögen des Bauteils aufgenommen.

2.3.4 Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen

2.3.4.1 Allgemeines

Aus baurechtlicher Sicht dürfen absturzsichernde Konstruktionen wie z. B. Brüstungen, Umwehrungen oder raumhohe Verglasungen nur eingebaut werden, wenn neben der statischen Tragfähigkeit (Einwirkungen gemäß DIN 1055 einschließlich Holmlasten) zusätzlich die Tragfähigkeit unter stoßartigen Einwirkungen (Stoßsicherheit) gewährleistet ist (Kapitel 2.4.6).

Nachdem die Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen [TRLV 98] für liniengelagerte Vertikal- und Überkopfverglasungen eingeführt waren, haben absturzsichernde Verglasungen in den letzten Jahren die zentrale Rolle bei Fragestellungen im konstruktiven Ingenieurglasbau gespielt. Es wurde erforderlich, neben den TRLV ein weiteres Regelwerk für absturzsichernde Verglasungen zu schaffen. Als die Entwurfsfassung der „technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen“ im März 2001 vom Deutschen Institut für Bautechnik veröffentlicht wurde, konnten erstmals absturzsichernde Glasbauteile mit speziell für den Werkstoff Glas erarbeiteten Regeln beurteilt werden. Im Januar 2003 wurde die endgültige Fassung der „technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen“ [TRAV 03] veröffentlicht und im Jahr 2004 in die Bauregelliste 2004/2 aufgenommen. Die Verwendbarkeitsnachweise von absturzsichernden Verglasungen sind seither entsprechend dieser Vorschrift zu führen.

2.3.4.2 Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung

Bereits 1985 war in DIN 52337 ein Pendelschlag auf eine Glastafel unter Vorgabe definierter Glasabmessungen und Lagerungsbedingungen geregelt. Das Sicherheitsrisiko dieses Vorgehens liegt in der fraglichen Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf andere Geometrien. Mit dem Ergebnis am Normprüfrahmen kann die Stoßsicherheit einer davon abweichenden Glaskonstruktion nicht verlässlich bewertet werden. Deshalb wird in den TRAV der Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung für jede Ausführungsform einer Glastafel eines Bauvorhabens gefordert. Folgende Möglichkeiten stehen zur Wahl:

- Werden konstruktive Vorgaben (Tragfähigkeiten von Schrauben zur Befestigung von Pressleisten, Glaseinstände etc.) eingehalten, können mit den Eingangsparametern "Kategorie" und "Abmessungen" stoßsichere Glasaufbauten aus Tabellen entnommen werden.
- Anhand eines Bauteilversuchs nach DIN EN 12600 (Pendelschlagversuch) kann die Konstruktion von einer akkreditierten Stelle mit einem allgemeinen baurechtlichen Prüfzeugnis bewertet werden.
- Durch „Stellungnahme“ eines Sachverständigen, der auf Erfahrungen bereits durchgeführter vergleichbarer Bauteilversuche zurückgreifen kann. Baurechtlich ist zur Bestätigung der

ausreichenden Tragfähigkeit der Konstruktion unter stoßartiger Einwirkung ebenfalls ein allgemeines baurechtliches Prüfzeugnis erforderlich.

- Aus Tabellen kann die maximale Beanspruchung während des Stoßes in Abhängigkeit von der Lagerungsart (zweiseitig, allseitig) und den Seitenlängen des Glases abgelesen werden. Diese tabellarisch ermittelten Spannungen werden den Kurzzeitfestigkeiten (siehe Tabelle 3) des entsprechenden Glaswerkstoffs gegenübergestellt. Die im Anhang C der TRAV genannten Tabellen wurden mit verschiedenen Berechnungsverfahren, die in [Br 01] und [Wö 00a] vorgestellt werden, erarbeitet. Die Berechnungsergebnisse wurden in die Tabellenwerte des Anhangs C der TRAV aufgenommen und mit bestehenden Versuchsdaten sowie mit FE – Simulationen des Stoßvorganges mit den Programmen SJ MEPLA [SJ 01] und ANSYS [AN 98] kontrolliert. Das Einhalten der zulässigen Spannungen weist nach, dass die Glastafel beim Anprall mit einer hohen Wahrscheinlichkeit nicht bricht. Die Tragreserve aufgrund der Zähigkeit der PVB-Folie, die auch bei gebrochenem Glas noch eine Membrantragwirkung gewährleistet, ging nicht in die Berechnung mit ein. Damit steht eine ingenieurmäßige Rechenmethode zur Bemessung von Glaskonstruktionen zur Verfügung, die vom Grundgedanken den altbekannten Tabellenwerken zur Plattenbemessung ähnelt.

2.3.4.3 Fallhöhen des Stoßkörpers bei Versuchen nach den TRAV

Die TRAV unterscheiden drei Kategorien von absturzsichernden Glastafeln. Raumhohe Glastafeln werden als Kategorie A bezeichnet (Bild 2.4). Ein möglicher Anprall eines Menschen erfolgt direkt auf das Glas. Die Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung wird mit einer Fallhöhe des Stoßkörpers von 900 mm geprüft.

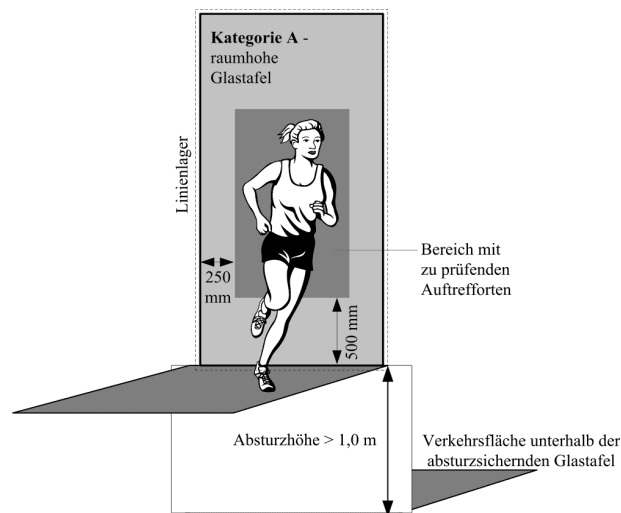


Bild 2.4: Kategorie A, raumhohe absturzsichernde Glastafel nach TRAV

Ist ein glasteilender Fassadenpfosten oder ein Handlauf vorhanden, kann dieser einen Menschenanprall teilweise abfangen. Diese Glastafeln der Kategorie C sind in Bild 2.5 dargestellt. Sie werden infolge des teilweise vom Handlauf aufgefangenen Anpralls geringer beansprucht und müssen deshalb nur mit Fallhöhen von 450 mm geprüft werden.

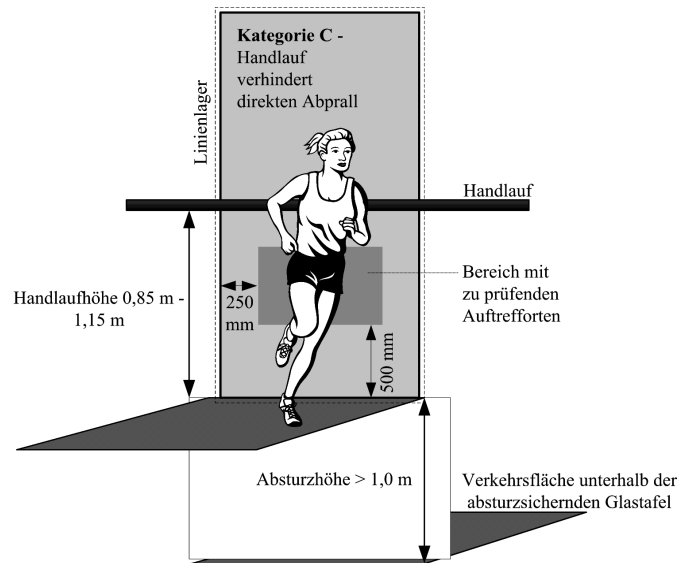


Bild 2.5: Kategorie C – absturzsichernde Glastafel mit vorgesetztem Handlauf nach TRAV

Brüstungsglastafeln, die am unteren Ende im Linienlager eingespannt werden, sind in die Kategorie B eingruppiert. Zur Beurteilung der Tragfähigkeit unter stoßartigen Einwirkungen wird eine Fallhöhe des Stoßkörpers von 700 mm gefordert.

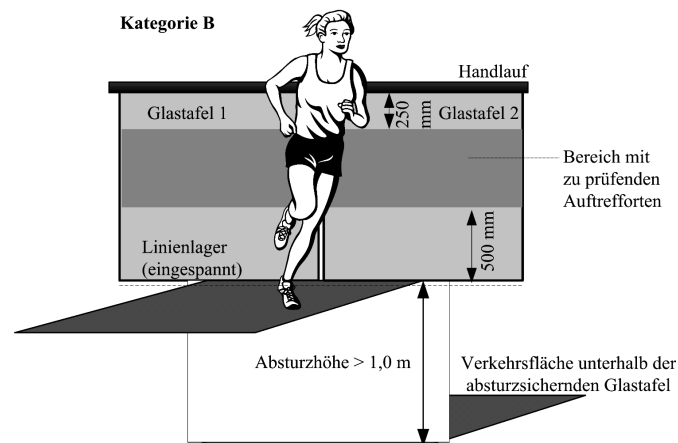


Bild 2.6: Kategorie B – Brüstungsglastafeln nach TRAV

Beim Bauteilversuch beinhalten die Fallhöhen bereits einen globalen Sicherheitsfaktor zur Berücksichtigung streuender Werkstofffestigkeiten und Einwirkungen, unbekannten Steifigkeitsverhaltens des anprallenden Menschen, Zwängungen, Prüfungenauigkeiten etc.. In [Wö 00a] und [Sc 01] wird das Prüfzenario der [TRAV 03] allerdings kritisiert, da es den Menschenanprall unrealistisch nachahmt. Bei Versuchen, mit gegen Glastafeln rennenden Menschen, wurden im Glas nur wesentlich geringere Beanspruchungen gemessen, als bei einem vergleichsweise kürzeren und härteren Stoßes des Zwillingssreifens (siehe Bild 5.11).

2.3.5 Anforderungen an Umwehrungen in anderen deutschen Regelwerken

Das Baurecht fordert für absturzsichernde Bauteile aus verschiedenen Werkstoffen unterschiedliche Nachweise. Stellen zudem andere Rechtsbereiche zusätzliche Anforderungen an

Absturzsicherungen, so weichen die Nachweisformen noch weiter voneinander ab. Die uneinheitlichen Vorgehensweisen bei der Beurteilung des Szenarios eines anprallenden Menschen sind nachfolgend aufgeführt.

2.3.5.1 Arbeitsstätten-Richtlinie

In der Arbeitsstätten-Richtlinie [ASR12/1] “Schutz gegen Absturz und herabfallende Gegenstände“ sind Konstruktionsregeln und Vorgaben bezüglich der statischen Einwirkung zur Bemessung von Umwehrungen vorgegeben. Stoßartige Einwirkungen sind nicht geregelt.

2.3.5.2 Messebau

Die Anforderungen an Messestände werden von der jeweiligen Messegesellschaft in „Technischen Richtlinien“ definiert. Mehrere Messegesellschaften haben sich diesbezüglich abgestimmt [MBAU 02]. Bei Umwehrungen werden die üblichen baurechtlich eingeführten Regeln gefordert (DIN 1055 und TRAV). Verletzungen sollen mit zusätzlichen Forderungen ausgeschlossen werden.

Es darf nur für den Einsatzzweck geeignetes Glas verwendet werden. Für Konstruktionen aus Glas darf nur Sicherheitsglas eingesetzt werden. Kanten von Glastafeln müssen so bearbeitet oder geschützt sein, dass eine Verletzungsgefahr auszuschließen ist. Ganzglasbauteile sind in Augenhöhe zu markieren [MBAU 02].

Umsetzungsregeln für diese allgemeinen Sicherheitsanforderungen sind nicht bekannt.

2.3.5.3 Verglasungen bei Aufzugsanlagen

Aufzugsanlagen werden verantwortlich vom TÜV beurteilt und überprüft. Die Stoßsicherheit der absturzsichernden Aufzugsverglasungen muss die Anforderungen der Norm [EN 81] erfüllen. Geprüft wird mit verschiedenen Pendelschlagversuchen (Schrotsack 45 kg, Fallhöhe 0,7 m und Stahlbirne 10 kg, Fallhöhe 0,5 m). Beschädigungen dürfen lediglich örtlich begrenzt an der Stoßstelle entstehen.

Der TÜV sieht den Einbau von bereits im Versuch geprüften Glastafeln als mögliche Schwachstelle der Konstruktion an.

Die für den Pendelschlagversuch benutzten Tafeln dürfen wegen möglicher Vorschädigungen durch den Pendelschlagversuch (auch wenn keine Beschädigungen registriert wurden) nicht mehr an Stellen mit Gefahr bei Glasbruch verwendet werden. [TÜV 03]

Grundsätzlich ist ein rechnerischer Nachweis zugelassen:

Anstelle von Pendelschlagversuchen darf der dynamische Nachweis auch rechnerisch geführt werden, wenn der Stoßvorgang ausreichend genau erfasst wird und das Rechenmodell experimentell abgesichert ist. [TÜV 03]

Die feststehende Aufzugswandverglasung stellt die Schnittstelle zum Baurecht dar. Entsprechend EN 81 müssen bei Aufzugsanlagen für die Schachtverglasungen zusätzlich die üblichen baurechtlichen Nachweise erbracht werden.

2.3.5.4 Brückengeländer

Der DIN Fachbericht 101 fordert bei Brücken lediglich, statische Ersatzlasten als Einwirkungen auf Geländer anzusetzen. In Hinblick auf einen möglichen Anprall ist nur ein allgemeiner Hinweis enthalten.

Außergewöhnliche Fälle und Unfallsituationen sind durch diese Lasten nicht abgedeckt. Es ist der zuständigen Behörde überlassen, solche Fälle zu ermitteln und bei einzelnen Projekten zu berücksichtigen. [DIN Fb 101]

Allgemein sind Verkehrslasten nach der DIN 1055-3 anzusetzen. Hierin sind jedoch keine Hinweise zum Lastfall „Menschenanprall“ geregelt.

2.3.6 Anforderungen an Umwehrungen in anderen europäischen Ländern

In England werden Einwirkungen bauwerksbezogen von den Baubeteiligten festgelegt. Im BS 6206 werden Anforderungen an Umwehrungen aus Glas definiert. Die ausreichende Tragfähigkeit bei statischen und dynamischen Lasten muss nachgewiesen werden. Eindeutige Größen oder Prüfzenarien werden nicht vorgegeben.

In Frankreich werden die Anforderungen an absturzsichernden Brüstungen (Glastafel am unteren Ende eingespannt) in der Norm GC 03 geregelt. Die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Brüstung ist mit Bauteilversuchen nachzuweisen. Die Tragfähigkeitsuntersuchung eines Brüstungselements erfolgt mit einem weichen Stoßkörper mit einer Masse von 50 kg und einer Anprallenergie von 900 J in Geländermitte (25 cm unterhalb der Holmhöhe) sowie mit einer Anprallenergie von 700 J in 1/3 der Holmhöhe und 25 cm von vertikalen freien Scheibenkanten. Zur Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit erfolgt ein Stoß mit einem harten Stoßkörper mit einer Masse von 0,5 kg und einer Energie von 3 J. Bei keiner Prüfung darf das Geländer durchschlagen werden.

Österreich hat die TRAV ohne inhaltliche Änderungen übernommen [A 08].

Die Schweizer Norm SIA 358 wurde von der „Schweizer Gesellschaft der Ingenieure und der Architekten“ (SIA) erstellt und ist am 1. Dezember 1996 in Kraft getreten. Sie wurde als Planungsnorm erlassen, definiert Gefahrenbilder (unbeaufsichtigte Kinder etc.) und die dazu erforderlichen Geländerhöhen bei verschiedenen Einsatzorten (Lehranstalten, Krankenhäuser, Büros, Wohnungen etc.). Neben Anforderungen an statische Lasten (SIA 160) werden in der Schweiz weitere Anforderungen an den Personenschutz in Zusammenhang mit Glas gestellt. Grundlage ist die Verordnung über die Unfallverhütung, VUV 83 Art. 15 und 21. Bei Glasbruch muss die Öffnung geschlossen bleiben, damit der Betroffene nicht abstürzen kann.

Die SIA 358 hat in der Schweiz keinen Gesetzescharakter. Sie erhält diesen erst, wenn sie in den Bauvorschriften der örtlichen Behörde erwähnt wird oder als anerkannte Regel der Baukunst im Prozessfall dient. Es gab bereits Fälle, bei denen Architekten und Bauherren aufgrund der Missachtung dieser Norm wegen fahrlässiger Tötung angeklagt und verurteilt wurden.

Es gibt somit keine zwingenden baurechtlichen Anforderungen, aber ein klar definiertes Schutzziel. Der Bauherr ist verantwortlich und muss die genannten Schutzziele einhalten. Konkrete Vorgaben, wie die Anforderungen zu erfüllen sind, fehlen jedoch.

Nach Auskunft eines Schweizer Glasherstellers aus dem Jahr 2004 orientieren sich die Bauteilteiligten in der Schweiz bei großen öffentlichen Bauvorhaben (Messen, Flughäfen etc.) an den „deutschen Anforderungen“. Bei „üblichen“ Bauvorhaben vertrauen die Bauherren auf die Vorgaben der Hersteller, da kein definierter Bauteilversuch zum Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung gefordert wird. Am Beispiel von Ganzglasbrüstungen, die an der Unterkante eingespannt sind (Kategorie B nach TRAV, Bild 2.6), lässt sich das Vorgehen in der Schweiz verdeutlichen. Unabhängig von der Lagerausbildung (geklemmte Konstruktionen oder mit Silikon vergossene usw.) wurden in Privatwohnungen Brüstungen aus 2 x 8 mm dicken ESG- oder TVG-Glastafeln eingebaut. In öffentlichen Bereichen wurden Glastafeln bestehend aus mindestens 2 x 10 mm ESG oder TVG verbaut. Ein durchgehender Metall-Handlauf, der im Gegensatz zu Holz nicht brechen und splintern kann, ist ebenfalls nicht ausdrücklich gefordert.

2.3.7 Auflistung und Diskussion der in unterschiedlichen Regelwerken geforderten Fallhöhen und charakteristischen Energien E_{Basis}

Auch die amerikanischen Norm [ANSI 97-75] setzt Versuche als Grundlage für die Einwirkungsgröße zum Tragfähigkeitsnachweis von Bauteilen beim Menschenanprall voraus. Einige Regelwerke verweisen auf diese Grundlagenuntersuchungen:

Streuungen der Größe der Einwirkungen brauchen nicht weiter berücksichtigt werden, da der Zahlenwert für E_{Basis} als realistische obere Grenze für die Anprallenergie bei Stößen durch menschliche Körper gegen vertikale Bauteile angesehen werden kann. [UEAtc 82]

Nach ETB müssen bei Bauteilen mit absturzsichernder Funktion zwei Einbausituationen - geringe oder große Menschenansammlungen - unterschieden werden. Dabei werden unterschiedliche Holmlasten vorgegeben, die Anforderungen an den weichen oder den harten Stoß gelten gleichermaßen.

Die Größe der Stoßenergien ist aus umfangreichen Versuchen, veranlasst von der Europäischen Union für das Agrément im Bauwesen (UEAtc), hergeleitet worden. Sie entspricht der Wirkung realer Stoßeinwirkungen, wie sie beim menschlichen Körperstoß [100 Nm] und beim harten Kantenstoß von Möbeln oder Kinderspielzeug [10 Nm] auftreten können. [Es 82]

Der Pendelschlagversuch auf Flachglas ist seit 1985 in der DIN 52337 geregelt. Die Fallhöhen des 45 kg schweren mit Schrot gefüllten Ledersacks wurden aus der ANSI Z 97.1-75 übernommen. Die Fallhöhen von 300 mm, 450 mm und 1.200 mm sollen Laufgeschwindigkeiten von 9 km/h, 11 km/h und 18 km/h abbilden. Zusätzlich wird angenommen, dass „... beim Auftreffen eines menschlichen Körpers von ≈ 75 kg beim Gehen und Laufen $\approx 6/10$ des Körpergewichtes wirksam werden, so entsprechen diese Fallhöhen etwa den Realitäten ...“ [DIN 52337, Erläuterungen Seite 10].

In Tabelle 2.3 sind die in verschiedenen Regelwerken geforderten unterschiedlichen charakteristischen Energien zusammengestellt, die beim Menschenanprall anzusetzen sind.

Tabelle 2.3: Charakteristische Anprallenergien

Masse [kg]	Fallhöhe ¹⁰ nach Glei- chung ¹¹ (3.2) [mm]	E _{Basis} [J]	Regelwerk (Abschnitt)	Bemerkung
Charakteristische Einwirkungen, Basisenergien aus Grundsatzuntersuchungen				
50	204	100	UEAtc	(2.21) Sicherheitsstöße weicher Stoßkörper, mit gehärteten Glaskugeln (Ø 3 mm) gefüllter sphäro-konischer Sack (Ø 0,4 m, Höhe 0,4m), „... Leicht zugänglich für die Öffentlichkeit und für Leute, die keinen Grund haben, sich vorzusehen ...“ Abs. 3.2
30	116	34		(2.21) Gebrauchsstöße weicher Stoßkörper
3	2.039	60		(2.23) weicher Stoßkörper, mit einer Mischung (Körnung 0 bis 2 mm) aus Sand und Bleischrot gefüllter Ball (Ø 0,1 m) aus gewebeverstärktem Weichgummi, für „... Bauteile mit bedeutenden Heterogenitäten (zum Beispiel Skelettwände mit geringem Stielabstand)...“
1	1.019	10		(2.22) Sicherheitsstöße harter Stoßkörper, Stahlkugel Ø 63,5 mm
0,5	612	3		(2.22) Gebrauchsstöße harter Stoßkörper, Stahlkugel Ø 50 mm „... Je nach dem Gefährdungsgrad der Bauteile gegenüber Stößen ...“ Abs. 2.22
0,5	1.223	6		
50	204	100	ETB	(3.2.2) E _{Basis} als einwirkende Energie, weicher Stoßkörper
1	1.019	10		(3.2.3) harter Stoßkörper
50	204	100	DIN 4103	- nichttragende innere Trennwände, die durchaus absturzsichernd sein können; weicher Stoßkörper
1	1.019	10		- harter Stoßkörper

Die englische Norm BS 6206 verweist ebenfalls auf die amerikanischen Versuche. Als maßgebende Einwirkung für das Szenario des Menschenanpralls an Bauteile wird ein Kind mit einer Masse von 45,36 Kilogramm angesehen. Dies scheint zunächst fragwürdig, da das Kind auch eine ausgewachsene Person konservativ abbilden soll. Nachvollziehbar ist dieser Ansatz nur dadurch, dass dem „repräsentativen“ Kind eine höhere Laufgeschwindigkeit als einem ausgewachsen Menschen unterstellt wird.

¹⁰ Dieser Ansatz geht davon aus, dass die Energie des Stoßkörpers vollständig auf den Prüfkörper übertragen wird und kein Energieverlust infolge einer Deformation des Stoßkörpers erfolgt.

¹¹ Die im Regelwerk geforderte Größe wird fett gedruckt, auf den Vergleichswert wird nach Gleichung (3.2) zurückgerechnet.

Bei vollem Lauf, in BS 6306 wurden 23,9 km/h angesetzt, entspricht dies theoretisch einer kinetischen Energie von ungefähr 1.000 J. Die tatsächlich auf die Glastafel übertragene Energie ist jedoch beträchtlich kleiner, da sich die theoretische Anprallenergie in verschiedene Komponenten aufteilt. Abminderungen ergeben sich wegen des Anprallwinkels und der Art und Weise des Anpralls. Über einen gestreckten, steifen Arm wird mehr Energie in die Glastafel eingetragen als mit einem angewinkelten Arm. Es wurde festgestellt, dass die Energie, die z. B. zuerst über die Hände, dann den Kopf und zuletzt von den Knien in ein Bauteil übertragen wurde, in Summe deutlich kleiner ist als die kinetische Energie des laufenden Kindes vor dem Anprall. Zudem wird der Anprall rechtwinklig zur Bauteiloberfläche als unwahrscheinlich angesehen. So wird es als ausreichend sicher erachtet, absturzsichernde Bauteile mit Prüfenergien nachzuweisen, die wesentlich kleiner als 1.000 J sind. Nach Auswertung umfangreicher experimenteller Daten¹² hat das American National Standard Institute Inc. (Aktenzeichen Z 97.1-1975) entschieden, dass für Prüfzwecke eine Basisenergie von $E_{\text{Basis}} = 100 \text{ Nm}$ ausreichend ist (übersetzt aus [BS 6 206]).

Die verschiedenen Regelwerke fordern die in Tabelle 2.4 zusammengestellten Fallhöhen oder Energien zur Simulation eines Menschenanpralls.

¹² Der Prüfumfang und die Art der Versuche sind nicht dokumentiert.

Tabelle 2.4: Energien beim Bauteilversuch

Masse [kg]	Fallhöhe ¹⁰ nach Gleichung (3.2) [mm]	E _{Basis} [J]	Regelwerk (Abschnitt)		Bemerkung
50	450	221	TRAV	(2.3.4)	Kategorie C, Stoßkörper nach DIN EN 12600
50	700	343			Kategorie B, Stoßkörper nach DIN EN 12600
50	900	441			Kategorie A, Stoßkörper nach DIN EN 12600
50	204	100 ¹³	ETB	2.3.3)	Prüfenergie bei wirksamer Masse < 50 kg
50	82	40			Prüfenergie bei wirksamer Masse > 400 kg
50	204	100	DIN 4103	(4.3.2)	nichttragende innere Trennwände, die durchaus absturzsichernd sein können; weicher Stoßkörper
1	1.019	10		(4.4.4)	harter Stoßkörper
10	500	49	EN 82	(Anhang A 3)	harter Stoßkörper
45	700	309			Weicher Stoßkörper nach DIN EN 12600
50	1.835	900	GC 03	-	Sicherheitsstoß mit einem Auftreffort in halber Konstruktionshöhe
50	1.427	700			Sicherheitsstoß mit einem Auftreffort bei 1/3 der Spannweite unterhalb eines Holmes
0,5	612	3			Gebrauchsstöße, geforderte Energie
1	1.019	10			Sicherheitsstoß
45	305	135	BS 6206	-	weicher Stoßkörper; je nach dem Gefährungsgrad der Bauteile gegenüber Stößen auf Verglasungen
45	457	202			
45	1.219	538			

2.4 Der Pendelschlagversuch

2.4.1 Allgemeines

Ursprünglich war der Pendelschlagversuch in DIN 52337 geregelt. Im Jahr 1998 wurde die PR EN 12600 veröffentlicht. Entsprechend dem Titel wird die „Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas“ seither nach deren Vorgaben durchgeführt. Als Stoßkörper wurde zunächst ein 45 kg schwerer Zwillingstreifen verwendet. In der endgültigen Fassung DIN EN 12600 (2003-04) ist nun eine Masse von 50 ± 1 kg vorgeschrieben. Der Stoßkörper wird an einem 1.500 mm langen Seil ausgelenkt (siehe Bild 2.8). Je nach Art der zu prüfenden Konstruktion wird er auf verschiedene Fallhöhen ausgelenkt. Neben den geometrischen Randbedingungen des Stoßkörpers und der Fallhöhen für eine Klassifizierung des zu prüfenden Bau-

¹³ Beim Nachweis mit Stoßversuchen ist die Aufprallenergie des Stoßkörpers so groß zu wählen, dass die Energie E_{Basis} auf den Prüfkörper übertragen wird.

teils sind in DIN EN 12600 auch die Abmessungen des Prüfkörpers mit $876 \pm 2 \text{ mm} \times 1.938 \pm 2 \text{ mm}$ festgelegt. Bei absturzsichernden Glasbauteilen werden in den TRAV darüber hinausgehende Anforderungen gestellt. Der Prüfkörper (Glastafel) ist in der im Bauwerk einzubauenden Originalgröße, mit dem geplanten Glasaufbau und der tatsächlichen Lagerung zu prüfen. Als Stoßkörper werden ballastierte Gummi-Reifen verwendet. Der prinzipielle Aufbau des Pendels¹⁴ ist in Bild 2.7 und Bild 2.8 dargestellt.

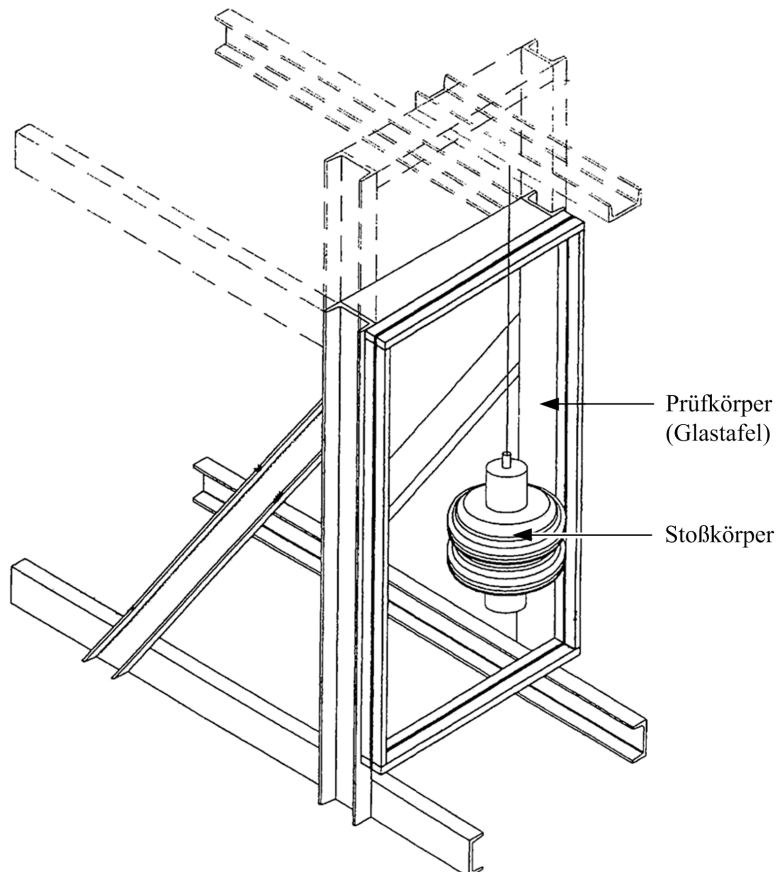


Bild 2.7: Versuchsaufbau des Pendelschlagversuches nach DIN EN 12600

¹⁴ Als Pendel wird die Einheit des Stoßkörpers und des Aufhängeseils bezeichnet

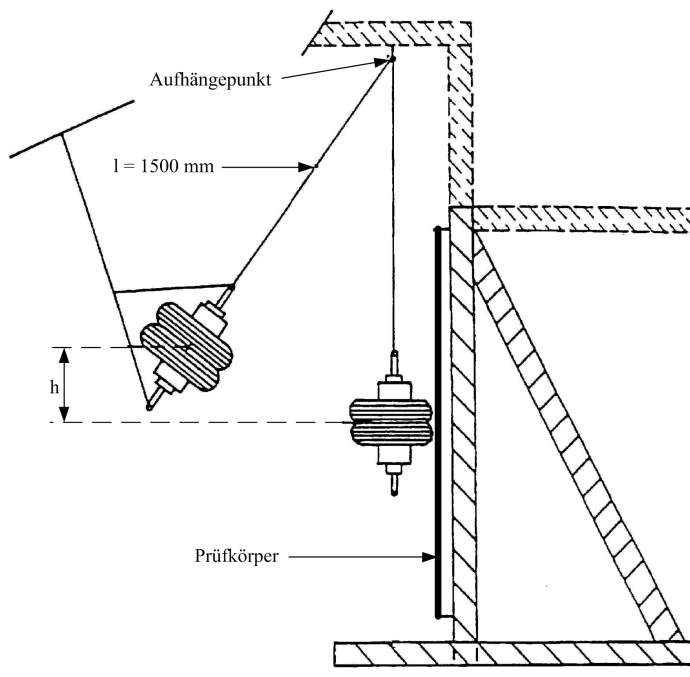


Bild 2.8: Seitenansicht des Versuchsaufbaus

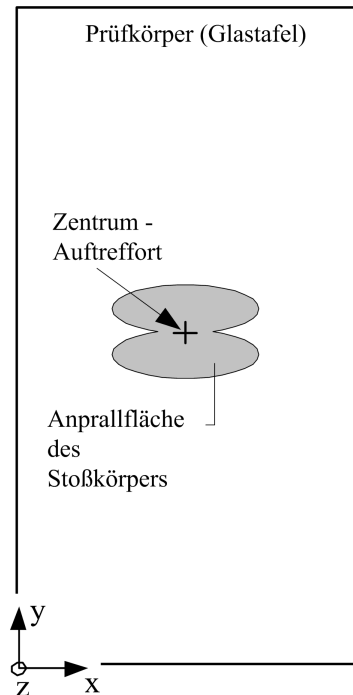


Bild 2.9: Ansicht des Prüfkörpers

2.4.2 Wechselwirkung zwischen Stoß- und Prüfkörper

Prallt der Stoßkörper gegen die Glastafel, verformt sich diese und wird zu Schwingungen angeregt. Der Verlauf des Schwingvorgangs ist abhängig von den Größe der Einwirkung, der Art der Lagerung des Prüfkörpers sowie den Massen- und Steifigkeitsverhältnissen zwischen Glastafel und Stoßkörper. Sobald eine Randbedingung (Auftreffort, Stoßkörpersteifigkeit usw.) variiert, verändert sich die Charakteristik des Stoßverlaufs und vom Stoßkörper werden andere Energieanteile (E_{kin} , E_{elast}) auf die zu prüfende Glastafel übertragen. Da das abzubildende Unfallszenario im Versuch nicht mit den tatsächlichen Stoßpartnern - Mensch und Glastafel - geprüft werden kann, müssen Ersatzstoßkörper zum Nachweis der Tragfähigkeit verwendet werden. Bei Bauteilversuchen mit Ersatzstoßkörpern gilt allgemein: Weichen die Massen bzw. die Steifigkeiten von den tatsächlichen Gegebenheiten ab, so stellt sich eine von der Realität abweichende Stoßcharakteristik ein. Damit wird ein anderes Stoßereignis geprüft. Abhängig von der Stoßkörpermasse und -steifigkeit wird ein jeweils zugehöriger Energieanteil auf den Probekörper übertragen. Ein Versuch kann den Anprall auf verschiedene Probekörper mit unterschiedlicher Masse und Steifigkeit nur dann richtig simulieren, wenn die Eigenschaften des Probekörpers vor jedem Versuch, abhängig von der Anprallgeschwindigkeit und Massen- Steifigkeitsverhältnisse angepasst werden. Weitere Hinweise dazu finden sich in [Li 72], Abschnitt 5. Realistische Prüfungen sind nur möglich, wenn der Stoßkörper den Anprall des Menschen realitätsnah nachahmt. Dazu muss das Pendel „... in seinen entscheidenden Eigenschaften (Verformungsverhalten) möglichst weitgehend mit dem Stoßkörper des realen Stoßes übereinstimmen ...“ [St 77], Abschnitt 2.1.

2.4.3 Stoßkörperarten

Seit 1985 war in DIN 52337 der Pendelschlagversuch mit einem bleischrotgefüllten Ledersack geregelt. Hauptkritikpunkt an der Norm war die Sicherheitslücke, die entstehen kann, wenn die dort am „Normrahmen“ ermittelten Ergebnisse auf beliebige Abmessungen und Lagerungsarten beim Bauvorhaben übertragen werden.

In Europa wurde mit verschiedenen Stoßkörpern nach DIN 52337 (Ledersack 45 kg, gefüllt mit Bleischrot), BS 6206 (Ledersack verstärkt 45 kg, gefüllt mit Bleischrot), EN 162 (Ledersack 30 kg, gefüllt mit Sand) oder ISO 7892 (Segeltuchsack 50 kg, gefüllt mit Glaskugeln) [Hu 95] geprüft. In Abhängigkeit des verwendeten Stoßkörpers ergeben sich bei identischer Fallhöhe unterschiedliche Versuchsergebnisse. Der Normenausschuss CEN/TC 129/WG 13 hat mit Prüfsäcken aus Leder verschiedener Institutionen und Firmen Pendelschlagversuche durchführen lassen. Mit den verschiedenen Stoßkörpern waren die Versuchsergebnisse nicht reproduzierbar und sehr unterschiedlich. Neben den verschiedenen dynamischen Steifigkeitseigenschaften der Sackfüllung lässt sich der Schwerpunkt von Säcken mit unbekannter Füllhöhe nur ansatzweise abschätzen. Deshalb ist mit diesen Versuchen die Beurteilung der Stoßsicherheit von Konstruktionen sehr ungenau. Vor diesem Hintergrund wird es verständlich, weshalb kein reproduzierbarer Stoßübertragungsfaktor, welcher die Energieübertragung definiert, ermittelt werden konnte.

DIN EN 12600 wurde mit dem Ziel erstellt, die nationalen Normungsansätze zu harmonisieren und dabei die Prüfmethode der verschiedenen Länder in möglichst gleicher Weise zu berücksichtigen. Der neue Schlagkörper sollte dauerhaft sein und reproduzierbare Versuchsergebnisse liefern. Neben all diesen Randbedingungen sollte er die Charakteristik des Menschenanpralls auf intaktes Glas "wirklichkeitsnah" wiedergeben [Hu 95]. Inspiriert durch die Schubkarre eines Gärtners, der während einer Normensitzung im Blickfeld der Ausschussmitglieder arbeitete, entstand die Idee einen Schubkarrenreifen zu verwenden. Mit an einer Felge angebrachten Zusatzmassen wurde die Masse des Stoßkörpers auf 45 kg erhöht. Alle bis dahin verwendeten Stoßkörper erzeugten beim Anprall gegen eine rechteckige ESG-Tafel mit den Abmessungen 10 mm x 875 mm x 1.938 mm bei einheitlicher kinetischer Energie des Stoßkörpers unterschiedliche auf die Glastafel einwirkende Kräfte. Mit dem neuen Stoßkörper, der aus einem auf 7 bar Innendruck aufgeblasenen Reifen bestand, wurde etwa der Mittelwert der so ermittelten Kraftmaxima erreicht [Sc 93].

Anschließende Versuche an Glastafeln zeigten jedoch, dass der aus nur einem Reifen aufgebaute Stoßkörper den Nachteil einer „Schneidenwirkung“ besitzt. Das bedeutet, dass ein Anriss der Polyvinyl – Butyral – Folie (PVB) bei Glasbruch teilweise zum großformatigen Aufklaffen eines horizontalen Risses führt. In Fachkreisen wurde vom "Briefkasteneffekt" gesprochen. Die schneidenartige Anprallfläche eines Reifens bildet den größerflächigen Anprall eines Menschen zu ungünstig ab. Abhilfe schafft die Modifikation des Schlagkörpers. Ein zweiter Reifen wurde im direkten Kontakt zum ersten Reifen angebracht. Infolge der größeren Anprallfläche wurden mit dem Doppelreifen wirtschaftlichere Prüfergebnisse erzielt. Eine Kontrolle der Eignung des Stoßkörpers (Doppelreifen) zur Abbildung des Menschenanpralls erfolgte durch den Vergleich der Daten aus wenigen Referenz Schulterstößen gegen

Glastafeln [Sc 93], [Fe 96]. Entscheidend für die Wahl des Doppelreifens als Standardprüfkörper waren die praxistaugliche Konstruktion und die Vereinheitlichung bestehender Prüfbedingungen. Eine Beurteilung der Versuchsergebnisse hinsichtlich des Verletzungsrisikos (z. B. für traumatorische Verletzungen oder Schnittwunden), dem der Mensch beim Anprall ausgesetzt ist, erfolgte nicht.

Nach Einsprüchen gegen den unzulässig hohen Reifendruck wurde der geforderte Prüfinnendruck von 7 bar auf 4 bar gesenkt. Für diesen niedrigeren Druck sind die Reifen vom Hersteller für den Einsatz an Fahrzeugen zugelassen. Der nunmehr weichere Prüfkörper bewirkt geringere Anprallkräfte bei einer längeren Stoßdauer. DIN EN 12600 wurde als harmonisierte Europäische Norm eingeführt. Das genormte Pendel besteht aus zwei Reifen mit 3,5 bar (bzw. 4,0 bar) Reifeninnendruck und einer Masse von 50 kg. Ein abschließender Abgleich mit dem eigentlichen Prüfscenario des anprallenden Menschen wurde nicht vorgenommen.

2.4.4 Fallhöhen

Die Fallhöhen bei der Bauteilprüfung nach TRAV sind so festgelegt, dass alle Unsicherheiten wie geringer Probenumfang, mögliche Glasüberfestigkeiten, Klimaeffekte, Bautoleranzen, unbekanntes Steifigkeitsverhalten des anprallenden Menschen etc. pauschal auf der Einwirkungsseite berücksichtigt sind. Der Pendelschlagversuch zum Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung muss den Menschenanprall unter Berücksichtigung der genannten Einflüsse konservativ abbilden. Es wird davon ausgegangen, dass alle Unsicherheiten (streuende Werkstofffestigkeiten, Toleranzen etc.) mit der Fallhöhe abgedeckt sind. Die Höhe des tatsächlich erforderlichen Sicherheitszuschlags ist unbekannt. Da beim Pendelschlagversuch nicht vorab bekannt ist, wie stark einzelne Faktoren das Stoßereignis beeinflussen, eignet sich eine Modifikation der Fallhöhe nicht, da so kein einheitliches Sicherheitsniveau bei verschiedenen Gegebenheiten gewährleistet werden kann. Dies widerspricht der Sicherheitsphilosophie der DIN 1055-100 und deren Teilsicherheitsfaktoren, da einzelne Einflüsse nicht getrennt bewertet werden können. Deshalb können derzeit die Prüfanforderungen nicht reduziert werden, selbst wenn z. B. eine qualitativ hochwertige Ausführung mit Fremdüberwachung dies rechtfertigen würde.

Die TRAV fordern je nach Art der zu untersuchenden Konstruktion Fallhöhen von 450 mm, 700 mm und 900 mm. Nach dem Auslösen des Pendels schlägt der Stoßkörper - beschleunigt von der Erdanziehung - mit der Geschwindigkeit v_0 nach Gleichung (3.1) horizontal gegen die Glastafel. Die im Versuch geforderte Stoßkörperenergie vor dem Anprall ist doppelt bis viermal so hoch, wie die in DIN 4103 oder ETB zum Nachweis der Absturzsicherung bei anderen Werkstoffen (Holz, Gipskarton, etc.) geforderte. Im Anhang A 3 werden in einer Tabelle die kinetischen Energien abhängig von der Fallhöhe zusammengestellt, mit denen der Doppelreifen auf eine Glastafel auftrifft. Der Stoßkörper enthält bereits bei einer Fallhöhe von 450 mm 2,2 mal mehr kinetische Energie, als die von der ETB-Richtlinie geforderte Basisenergie. Die Basisenergie wird zum Nachweis von absturzsichernden Bauteilen gefordert und gilt für Situationen bei üblicher Nutzung. Bei der Verabschiedung der Endfassung der TRAV konn-

ten die bis dahin für raumhohe Verglasungen geforderten Fallhöhen von bis zu 1.200 mm auf Basis der Ergebnisse der Untersuchungen in [Wö 99] reduziert werden. Auf eine Unterscheidung der erforderlichen Fallhöhen in Anhängigkeit von möglichen Anlaufwegen wurde jedoch in der aktuellen Fassung der TRAV verzichtet.

Ein ausgelenkter Stoßkörper hat nach dem Auslenken die potentielle Energie E_{pot} nach Gleichung (2.2). Wie hoch die vom Stoßkörper auf die Glastafel tatsächlich übertragene Energie ist, wurde bisher nicht rechnerisch untersucht und ist deshalb unbekannt. Die Klärung dieser Fragestellung bildet einen wesentlichen Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

$$E_{\text{pot}} = m_{\text{sk}} \cdot g \cdot h \quad (2.2)$$

Hierin ist:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
E_{pot}	Potentielle Energie	[Nmm]
m_{sk}	Masse des Stoßkörpers	[kg]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Fallhöhe	[mm]

2.4.5 Reproduzierbarkeit von Pendelschlagversuchsergebnissen

Seit der Pendelschlagversuch baurechtlich gefordert wird, werden absturzsichernde Glastafeln mit dickeren Gläsern als früher oder als im Ausland gebaut. Subjektiv erscheinen diese Konstruktionen robust. Deshalb hat sich Vertrauen in die Tragfähigkeit von Glaskonstruktionen verbreitet, die mit dem Pendelschlagversuch geprüft werden. Das Versuchsergebnis - meist nur wenige Schläge auf ein bis zwei Glastafeln – werden auf alle gleichen oder ähnlichen Tafeln eines Bauvorhabens übertragen. Aber wie aussagekräftig sind Pendelschlagversuche?

Werden Wiederholungsversuche in exakt gleicher Weise ausgeführt, so werden die Ergebnisse übereinstimmen. Diese Wiederholgenauigkeit lässt sich in der Realität jedoch nicht erzielen. In [St 77], Abschnitt 2.3 wird über Streuungen von Ergebnissen von Pendelschlagversuchen berichtet: „... Die bei dieser Art von Stoßversuchen sich noch besonders bemerkbar machenden Streuungen der Eigenschaften der Probekörper wirken sich außerdem vergrößernd auf die erforderliche Versuchsanzahl aus ...“. Der Stoßkörper nach DIN EN 12600 hat homogenere und reproduzierbarere Steifigkeitseigenschaften als die alten sandgefüllten Ledersäcke, deshalb streuen die Versuchsergebnisse deutlich geringer. Einflüsse infolge streuender Werkstoffeigenschaften und Dickenvariationen der Glastafel, unterschiedlichen Fallhöhen, Lagerungs- und Klimabedingungen bestehen weiterhin.

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde ein FE – Modell des Stoßkörpers entwickelt, das wie im Kapitel 1.1.1 beschrieben und durch den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Versuchsdaten verschiedener Prüfinstitutionen bestätigt wird. Rechnet man auf Basis der TRAV geforderten Fallhöhen die eingetragenen Energien zurück, so wurden die erforderlichen Werte nicht bei allen Versuchen erreicht. Beim

in Bild 3.13 dargestellten Versuch fehlen 4,7 % und bei dem in Bild 3.14 dargestellten Versuchsergebnis sogar 24,5 % des geforderten Wertes. Rückfragen haben ergeben, dass Ungenauigkeiten infolge verzögerter Auslösung und Taumelbewegungen des Stoßkörpers mögliche Ursachen für die Abweichungen sind. Wird der Stoßkörper nicht über eine Stange geführt (Bild 2.10 a) sondern am Seil ausgelenkt (Bild 2.10 b) wird der Stoßkörper infolge der Massenträgheit leicht schräg auf den Prüfkörper auftreffen. Unter Umständen hat der Beschleunigungsaufnehmer infolge der Schrägstellung des Stoßkörpers nur die horizontale Beschleunigungskomponente gemessen. Berechnungsergebnisse mit unterschiedlich schräg anprallenden Stoßkörpern sind in Bild 3.55 dargestellt.

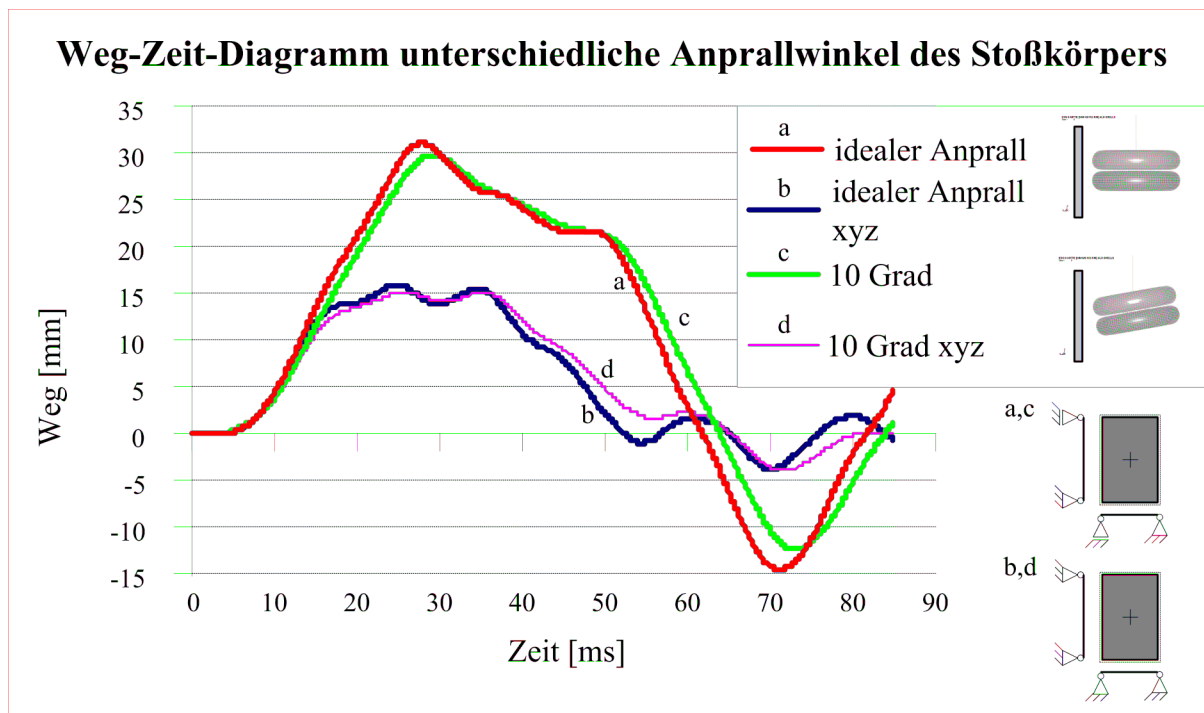


Bild 3.55: Einfluss unterschiedlicher Anprallwinkel des Stoßkörpers

Außerdem lässt sich die Fallhöhe nicht immer exakt bestimmen, da die Lage des Schwerpunkts nur geschätzt werden kann (siehe Anhang A 13 Bild A13) - deshalb streuen die Versuchsergebnisse. Die Geometrie der Reifenprofile (Beschädigung durch Glasscherben) und die Werkstoffeigenschaften der Reifen verändern sich zusätzlich mit der Zeit. Die Größe des Einflusses auf das Prüfergebnis infolge einer möglichen Versprödung und Versteifung durch die Alterung des Reifens wurde bisher nicht untersucht. Im rechnerischen Bemessungsvorschlag der vorliegenden Arbeit wird die tatsächlich auf die Glastafel übertragene Energie überprüft. Gegebenenfalls wird in einem weiteren Berechnungslauf die Energie des Stoßkörpers vor dem Anprall gesteigert, bis die zum Nachweis erforderliche Energiemenge übertragen wird.

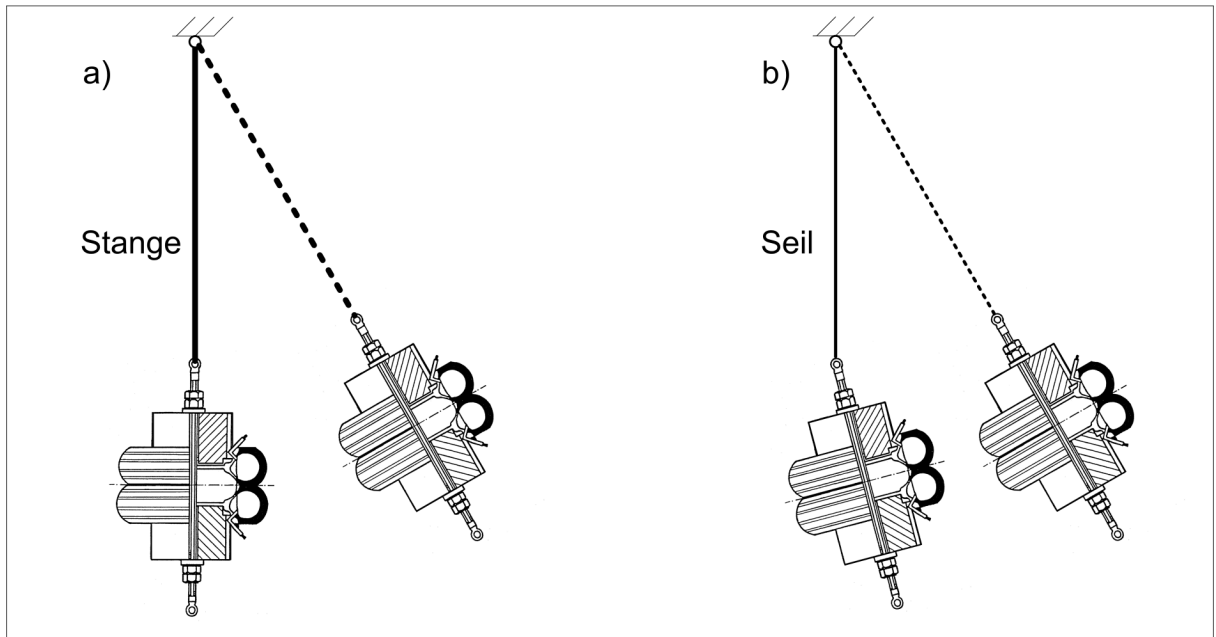


Bild 2.10: Unterschiedliche Auftreffstellungen des Stoßkörpers - idealer a) und schräger b) Anprall

Die nachfolgenden Auswertungen zeigen gemessene Streuungen von Pendelschlagversuchsergebnissen.

In [Wö 00a], Abschnitt 3.4 wurden mehrere Serien von Pendelschlagversuchen mit „gleichen“ Fallhöhen auf eine Glastafel durchgeführt. Für die vorliegende Arbeit wurden von jeder Serie der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Es ergeben sich die in Tabelle 2.5 und Tabelle 2.6 zusammengefassten Werte:

Tabelle 2.5: Streuungen der Pendelschlagversuchsergebnisse mit 450 mm Fallhöhe [Wö 00a]

Maximalbeschleunigung des Pendels [m/s^2], Fallhöhe 450 mm, Probenumfang $n = 5$		Maximaldehnung in der Glastafel [$\mu\text{m/m}$], Fallhöhe 450 mm, Probenumfang $n = 5$	
Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
211,1	1,5	1.991,2	9,8

Tabelle 2.6: Streuungen der Pendelschlagversuchsergebnisse mit 700 mm Fallhöhe [Wö 00a]

Maximalbeschleunigung des Pendels [m/s^2], Fallhöhe 700 mm, Probenumfang $n = 3$		Maximaldehnung in der Glastafel [$\mu\text{m/m}$], Fallhöhe 700 mm, Probenumfang $n = 3$	
Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
265,4	1,4	2.248,1	3,2

An der Technischen Universität Braunschweig wurden Pendelschlagversuche mit einem gegen eine Holzplatte schlagenden mit Glaskugeln gefüllten Ledersack durchgeführt [Um 04]. Die Holzplatte mit den Abmessungen 500 mm x 500 mm x 12 mm (Mehrschichtplatte) wurde über vier Kraftmessdosen mit der Unterkonstruktion verbunden. Die Unterkonstruktion bestand aus zwei gekreuzten und verschweißten Quadrathohlprofilen (30 mm x 30 mm x 2 mm).

Das ganze System war mit Trägerklemmen an einer massiven Hallenstütze befestigt. Für die vorliegende Arbeit wurde der Mittelwert des Kraftmaximums und dessen Standardabweichung aus mehreren Versuchen mit nominal gleicher Fallhöhe berechnet. Die Werte sind in Tabelle 2.7 zusammengestellt.

Tabelle 2.7: Streuungen der Pendelschlagversuchsergebnisse [Um 04]

Kraft gemessen [kN], Fallhöhe 204 mm Probenumfang n = 8		Kraft gemessen [kN], Fallhöhe 456 mm Probenumfang n = 2	
Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
3,2	0,4	5,7	0,6

An der Fachhochschule München [Sc 05] wurden Pendelschlagversuche gleicher Fallhöhe auf ein Schalelement der Fa. PERI durchgeführt (siehe Kapitel 5.3.5). An jeder Ecke war eine Kraftmessdose angeordnet. Die Summe der Messwerte der vier Kraftmessdosen wurde hier ausgewertet sowie der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Das Ergebnis ist in Tabelle 2.8 zusammengefasst.

Tabelle 2.8: Streuung der Pendelschlagversuchsergebnisse [Sc 05]

Kraft gemessen [kN], Fallhöhe 450 mm Probenumfang n = 3		Kraft gemessen [kN], Fallhöhe 700 mm Probenumfang n = 3	
Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
12,9	0,2	15,0	1,1
Kraft gemessen [kN], Fallhöhe 900 mm Probenumfang n = 3			
Mittelwert	Standardabweichung		
19,5	1,0		

Ein weiterer Hinweis zur streuenden Einwirkung beim Pendelschlagversuch sind die im Kraftstoß rückgerechneten Energien, die für zwei Stöße in Kapitel 3.5.2 dargestellt sind. Selbst für Fachleute, die ständig Pendelschlagversuche durchführen, ist es schwierig, die Größe der Streuungen einzuschätzen. Hierzu wurden einige Prüfstellen befragt [Br 04c]. In Bild A 13 sind die Einschätzungen der möglichen Streuungen zusammengestellt die sich aus der Umfrage ergeben haben. Aus den aufgeführten Daten lässt sich ableiten, dass bei den Pendelschlagversuchen die Einwirkungen bis zu 25 % streuen können, d.h. dass bis zu 25 % mehr oder weniger Energie beim Pendelschlagversuch in das Bauteil eingetragen werden kann.

2.4.6 Versagenszustand

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit ist erreicht, falls:

- Eine Glastafel von einem anprallenden Menschen oder einem Gegenstand durchschlagen wird.
- Splitter auf Verkehrsflächen fallen.
- Die Konstruktion insgesamt oder in Teilen versagt.

Als Kriterium des Durchschlagens ist eine Rissöffnung definiert. Passt eine Kugel mit 76 mm Durchmesser durch einen entstandenen Riss, wird der Pendelschlagversuch als nicht bestanden bewertet. Es wurde in Anlehnung an den Kugelfallversuch zur Prüfung der Verbundeigenschaften von Polyvinyl – Butyral – Folien nach DIN 52338 gewählt.

2.5 Glaseigenschaften

2.5.1.1 Allgemeines

Insbesondere die europäischen Produktnormen regeln überwiegend optische Eigenschaften und zulässige Maßabweichungen. Mechanische Kennwerte wie der Elastizitätsmodul sind nur als Richtwert angegeben. Vorgaben zu Werkstofffestigkeiten fehlen zum Teil vollständig. Hier werden nur die Glaseigenschaften betrachtet, die zur Simulation des Stoßvorgangs erforderlich sind.

2.5.1.2 Verbundeigenschaften

Bei VSG entsteht durch die PVB Zwischenlagen eine Verbundnachgiebigkeit, die von der Belastungsdauer und der Bauteiltemperatur abhängig ist. Die TRAV lässt jedoch den Ansatz eines vollen Verbundes bei der Kurzzeitbelastung des Anpralls zu. Diese Annahme wurde wissenschaftlich nicht abgesichert. In [Sc 03] wurde bei VSG ein vermindertes Verbundverhalten auch bei Kurzzeiteinwirkungen festgestellt. Auch Messergebnisse [Bu 04a] bestätigen lediglich einen Teilverbund. Dass tatsächlich kein voller Verbund vorhanden ist, zeigten die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche (Bild 3.70).

2.5.1.3 Festigkeit

Der Pendelschlagversuch beansprucht ein Glasbauteil nur kurzzeitig. Glas ist eine erstarrte Schmelze, das je nach Glasart, Umwelteinflüssen, Vorschädigungen der Glasoberflächen, Belastungsdauer und -geschwindigkeit unterschiedliche Festigkeiten aufweist. Mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit nimmt die Glasfestigkeit zu. In [Sc 01] und [Rü 02a] wurden die Kurzzeitfestigkeiten für Glas unter stoßartiger Einwirkung mit bruchmechanischen Modellen berechnet. Diese Ergebnisse sind in die TRAV eingeflossen. Den Bemessungstabellen im Anhang C der [TRAV 03] liegen die in Tabelle 3, siehe Seite XVII, aufgeführten zulässigen Biegespannungen ($\sigma_{\text{zugStoß}}$) an der Glasoberfläche zugrunde, die in den nachfolgenden numerischen Beispielen zur Anwendung kommen. In [Rü 02a] Abschnitt 3.4.1 wird die Vermutung geäußert, dass sich die Glasfestigkeit während der Nutzungsdauer ändern

könnte. Unstrittig ist, dass Kratzer in der Glasoberfläche die Festigkeit reduzieren. Bei gleicher äußerer Einwirkung tritt an der vorgeschädigten Stelle infolge der Kerbwirkung eine Spannungsspitze auf, die zu einem vorzeitigen Bruch führt. Solche Oberflächenbeschädigungen können durch die Scheibenreinigung oder den Anprall von Partikeln entstehen. An fast 50 Jahre alten Proben von [Fi 00] durchgeführte Versuche ergaben äußerst geringe Streuungen der ermittelten Biegezugfestigkeiten. Versuche von Fink [Fi 00] an fast 50 Jahre alten Glasproben ergaben äußerst geringe Streuungen der Biegezugfestigkeiten. Grund dafür ist vermutlich eine die Kerbschärfe vermindernde Glaskorrosion im Rissgrund. Dieser als „Rissheilung“ bezeichnete Prozess vermindert die Kerbspannungen im Glas. Fink hat mit systematischen Versuchsreihen belegt, dass geschädigte Glastafeln nach erfolgter Rissheilung im Mittel höhere Bruchspannungen ertragen konnten als Glastafeln die direkt nach der Schädigung bis zum Versagen beansprucht wurden.

Über einen längeren Zeitraum betrachtet heben sich die Wirkungen der Effekte, die die Biegezugfestigkeit von Glas reduzieren (Kratzer) und wieder erhöhen (Rissheilung) gegenseitig auf. So bestehen keine Bedenken gegen die Anwendung der in Tabelle 3 angegebenen Glasfestigkeiten.

2.5.1.4 Variationskoeffizient der Biegezugfestigkeit von Glas

Die Biegezugfestigkeit der Glasproben werden in Vierpunktbiegeversuchen ermittelt. Die Streuung der Werkstofffestigkeit ist ein Unsicherheitsfaktor, der berücksichtigt werden muss. Das Maß der Streuung wird mit dem Variationskoeffizienten charakterisiert (weitere Hinweise siehe Anhang A 12). Im Glasbau ist es üblich die charakteristische Biegezugfestigkeit mit dem 5 % – Fraktilwert bei einer 95 % – igen Aussagewahrscheinlichkeit aus Versuchsergebnissen zu berechnen. Ein großer Probenumfang hilft die charakteristische Biegezugfestigkeit der Grundgesamtheit aller hergestellten Glastafeln besser abzuschätzen. Die größte Versuchszahl liegt den Ergebnissen aus [Br 89] zugrunde. Die an der Bundesanstalt für Materialprüfung durchgeführten Versuche waren auch die Grundlage der Festlegung der charakteristischen Biegezugfestigkeiten in DIN 13474.

Auf Basis der in Tabelle A 12.1 aufgeführten Ergebnisse wird im Weiteren ein Variationskoeffizient der Biegezugfestigkeiten von 0,26 für Spiegelglas angesetzt. Die Biegezugfestigkeiten vorgespannter Gläser streuen geringer als bei Spiegelglas.

2.6 Zusammenfassung

Absturzhemmende Konstruktionen müssen dem Anprall eines Menschen standhalten. Der ungünstigste Lastfall ist ein Menschenanprall bei hoher Schrittgeschwindigkeit, das heißt hohe kinetische Energie. In der UEAtc-Leitlinie ist die auf der Basis von Versuchen festgelegte charakteristische Anprallenergie vorgegeben. Diese Einwirkungen in Form von Energien sind in Deutschland Stand der Technik und werden seit Jahren zum Nachweis von absturzsichernden Bauteilen verwendet. Unzulänglichkeiten dieses Lastansatzes sind nicht bekannt, die geforderte charakteristische Energie E_{Basis} zum Nachweis der Tragfähigkeit einer Konstruktion unter stoßartiger Einwirkung wird als ausreichend angesehen.

Für Glasbauteile werden in anderen Ländern sowie beim Baurecht oder beim Arbeitsrecht für dieses Szenario abweichende Prüfungen gefordert. Die unterschiedlichen Energien mit denen Glasbauteile dort geprüft werden, sind in Tabelle 2.3 zusammengestellt. Für absturzsichernde Bauteile gibt die bauaufsichtlich eingeführte ETB-Richtlinie Einwirkungen auf Basis systematischer Versuchsreihen vor.

Hier durchgeführte Auswertungen von Pendelschlagversuchen belegen streuende Prüfergien bei nominal gleichen Fallhöhen. Die beim Stoß auf ein Bauteil übertragene Energie hängt von den Steifigkeits- und Massenverhältnissen der beiden Stoßpartner ab. Im Pendelschlagversuch repräsentiert jeder Auftreffort des Stoßkörpers ein anderes Anprallszenario und trägt eine unterschiedlich hohe Energie in den Prüfkörper ein. Hierdurch ergibt sich ein uneinheitliches Sicherheitsniveau. Dieses kann nur mit einer geeigneten rechnerischen Simulation durch Kontrolle und Anpassung der Energieanteile erreicht werden.

Die Erarbeitung eines solchen Simulationsmodells bildet den Kern der vorliegenden Arbeit und wird in den folgenden Kapiteln ausführlich dargestellt.

3 Rechnerische Simulation des Pendelschlagversuchs

3.1 Allgemeines

Schlägt beim Pendelschlagversuch der Stoßkörper auf eine Glastafel, verformt sich diese und schwingt. Die potentielle Energie des ausgelenkten Stoßkörpers wird nach dem Auslösen in kinetische Energie umgewandelt. Beim Anprall teilt sich die Gesamtenergie in vier verschiedenen Teilenergien. Ein Teil der Energie wird in dem sich elastisch verformenden Stoßkörper gespeichert. Infolge seiner Bewegung enthält er kinetische Energie. Zwei weitere Teilenergien werden als kinetische und elastisch gespeicherte Energie in die Glastafel eingetragen. Vorhanden Reibung zwischen den Stoßpartnern oder Dämpfungen des Schwingungsverhaltens dissipieren eine geringe Menge der ursprünglichen Lageenergie. Die Höhe der während des Stoßes übertragenen Energie wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst.

DIN 4103 und die ETB-Richtlinie erlauben den rechnerischen Nachweis von absturzsichernden Bauteilen für andere Werkstoffe bereits seit Jahren, der Werkstoff Glas ist davon ausgenommen. Grundlage für diese Regeln sind die Arbeiten von Limberger und Struck [St 67], [Li 72], [Li 75], [St 76], [St 78], [IfBt 82]. In diesen Untersuchungen sind die Stoßübertragungsfaktoren für zahlreiche Massen- und Steifigkeitsverhältnisse von absturzsichernden Bauteilen angegeben. Mit diesen kann der Energieübertrag in Bauteile berechnet werden. Im Vergleich zu Glastafeln sind die dort beurteilten Aufbauten aus beplankten Skelett- und Gipssteinwänden usw. meist schwerer bzw. steifer. Zudem haben diese im Gegensatz zu Glasplatten eine einachsige Tragwirkung. Die Ergebnisse von Stoßversuchen an diesen Aufbauten weisen geringere Streuungen als die bei Pendelschlägen gegen Glastafeln auf. Der Einfluss eines im Vergleich zum Stoßkörper schwereren Prüfkörpers ist in den im Anhang A 8 aufgeführten Berechnungsergebnissen dargestellt. Bei der bauaufsichtlichen Einführung der Regelwerke DIN 4103 und ETB in den Jahren 1984/85 wurde der Werkstoff Glas aufgrund der beschriebenen Streuungen der Pendelschlagergebnisse und der damit verbundenen ungelösten Fragen zur sicheren Dimensionierung dieser Konstruktionen ausgeschlossen. In der vorliegenden Arbeit wurden mit FE – Simulationen die verschiedenen stoßbeeinflussenden Parameter untersucht. Mit dem Auftreffort¹⁵, der Tafelgröße und dem Tafelaufbau sowie der Lagerungsart variieren die wirksame Masse und Steifigkeit der Glastafel. Ein nichtlineares Schwingungsverhalten der Glastafel ist die Folge. Die Parameterstudien (Kapitel 3.6.4) zeigen die Größenordnung dieser Einflüsse. Die charakteristischen Massen- und Steifigkeitsverhältnisse von Glastafeln erzwingen einen Stoßverlauf, der zusätzlich auch von den Eigenschaften des Stoßkörpers beeinflusst wird. Somit ist es nicht möglich, auf der Basis von nur wenigen Versuchen realistische Energieübertragungsfaktoren zu bestimmen. Die Untersuchungen [Hu 95] belegen für verschiedene Stoßkörper unterschiedliche Stoßcharakteristika. Die Eigenschaften

¹⁵ Auftreffort des Stoßkörpers auf der Glastafel nach Bild 2.8.

des mit Bleischrot gefüllten Ledersackes änderten sich nach jedem Stoß. Plastische Verformungen des Bleischrotes oder eine dichtere Lagerung treten auf. Abhängig von der Steifigkeit des Stoßkörpers ändern sich die übertragenen Energieanteile. So ist eine Streuung des Versuchsverlaufs nachzuvollziehen. Zudem sind Versuche mit Säcken deshalb schwerer reproduzierbar, weil die Schwerpunktlage eines Sackes nur geschätzt werden kann.

Die vorliegende Arbeit belegt, dass Stoßübertragungsfaktoren sich auch für Glastafeln numerisch berechnen lassen. Aufgrund der Vielzahl der Einflussparameter ist es nicht möglich, diese allgemeingültig zu bestimmen. Es ist zweifellos wirtschaftlicher und sicherer aufzuzeigen, wie ein qualifiziertes FE – Modell zur Simulation des auf eine Glastafel anprallenden Stoßkörpers aufgebaut und angewendet werden muss, als zahllose Konstruktionssituationen zu tabellieren (siehe TRAV, Tabelle 2).

Realistische Ergebnisse bei der rechnerischen Simulation des Pendelschlagversuchs auf Glastafeln erhält man nur mit einem geeigneten und validierten FE – Modell. Bisher wurde der erforderliche Detaillierungsgrad vom Anwender häufig unterschätzt. Nachfolgend werden Benchmarkmodelle vorgestellt, mit denen die für die Berechnung des eigentlichen Stoßproblems erforderlichen Eingangsparameter kontrolliert werden können. Bei Einscheiben-Sicherheitsglas zeigte sich, dass mit den Werkstoffkennwerten, die bei statischen Analysen im Glasbau verwendet werden, keine befriedigende Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen erreicht wird.

In systematischen Versuchsreihen mit eindeutig definierten Lagerungsbedingungen, bei denen der Einfluss der Einspannung zwischen den Elastomerlagern ausgeschaltet war, wurde der erforderliche dynamische Elastizitätsmodul von Einscheiben-Sicherheitsglas bestimmt. Aufbauend auf diesen Versuchsergebnissen werden für die Einzelkomponenten, Pendel und Glas mit Linienlagerung bei Berücksichtigung des Verbundverhaltens Benchmarkmodelle entwickelt. Werden die Teilmodelle an diesen Daten einzeln validiert, entsteht die Basis für ein „validiertes“ Gesamt – FE – Modell, das Bauteilversuche (Pendelschlag) an Verbund-Sicherheitsglastafeln und Mehrscheiben-Isolierglastafeln zuverlässig berechnet und somit den Pendelschlagversuch realistisch simuliert, d.h. den Versuch weitgehend ersetzen könnte.

Zum Stand des Wissens der rechnerischen Simulation des Stoßvorganges mit der Methode der Finiten Elemente finden sich zahlreiche Arbeiten. 1996 simulierte Hiermaier [Hi 96] den Anprall von Projektilen auf Glasbauteile. Mit dem entwickelten Verfahren konnten Anprallgeschwindigkeiten von 400 m/s auf Glasbauteile untersucht werden. Die erste rechnerische Simulation des elastischen Stoßes eines Doppelreifens auf Glasbauteile mit Geschwindigkeiten von 2 bis 4 m/s wurde 1998 vorgestellt [Sc 98]. Dabei wurde der Stoßkörper als Zylinderausschnitt mit linear elastischem Werkstoffverhalten abgebildet. Die rechnerisch ermittelten Verformungen und Beschleunigungen der Glastafel beschreiben das im Versuch [Rü 99] gemessene Verhalten in guter Näherung. 1999 wurde von Kipf ein aufwändigeres FE – Modell vorgestellt, das die Kontaktfläche zwischen Glas und Prüfkörper mit der realen Form als doppelter Torus abbildet [Ki 99]. In einer Diplomarbeit [Sc 99] wurde der Einfluss unterschiedlicher mit FE modellierter Geometrien der Auftrefffläche auf die Beanspruchung im Glas untersucht. Die Kontaktproblematik zwischen Glas und Stoßkörper wurde in [Kn 99]

untersucht. In [Bo 99] und [Bo 00] wurden Pendelschlagberechnungen mit dem FE – Programm SJ MEPLA [SJ 01] vorgestellt. [Br 01] verifizierte mit Versuchen die nichtlineare Steifigkeitscharakteristik des Stoßkörpers (siehe Gleichung (3.6)) im Programm SJ MEPLA. Weitere Untersuchungen zur rechnerischen Simulation des Pendelschlages erfolgten in [Se 01], [Sc 01] und [Rü 02a]. Ziel dieser Untersuchungen war, den normativ geregelten Pendelschlagversuch rechnerisch nachzubilden. Die verwendeten FE – Programme gestatteten lediglich eine Simulation mit elastischen Ersatzstoßkörpern. Die Nachweistabellen im Anhang der E-TRAV wurden von Wörner und Schneider [Wö 00a] mit einem Zweimassenschwinger-Modell berechnet. Die endgültige Fassung der TRAV enthält überarbeiteten Bemessungstabellen auf der Basis von transienten¹⁶ Berechnungen mit ANSYS und SJ MEPLA.

Der Bauteilversuch wurde, mit stark vereinfachenden Idealisierungen des Stoßkörpers, auch mit anderen FE – Programmsystemen wie z. B. Sofistik nachgebildet [Qu 02]. In [He 03] wurde mit dem Programm „Straus 7“ ein Pendelmodell an Versuchsergebnissen kalibriert. Bei den genannten Untersuchungen konnten mit einfachen FE – Modellen die charakteristischen Verläufe einzelner Messreihen (z. B. Pendelbeschleunigungen) angenähert werden. In vielen der vorgestellten Arbeiten wurde die Simulation als ausreichend genau angesehen, nachdem sich die Messergebnisse des Stoßproblems „konservativ“ abbildeten. An die Güte der Übereinstimmung stellten die Autoren unterschiedliche Maßstäbe. Gründe für mögliche Abweichungen - wie z. B. Verformungsdifferenzen der Innen- und Außentafeln bei MSI usw. - wurden seither nicht wissenschaftlich untersucht. Aus den Versuchsergebnissen der vorliegenden Arbeit zum Werkstoffverhalten von Glas unter Stoßeinwirkung können diese Diskrepanzen erklärt werden.

Für die vorliegende Arbeit wurden zahlreiche FE – Simulationen mit validierten Modellen durchgeführt (siehe Anhang A5). Sind die berechneten Spannungen kleiner als die Grenzwerte nach Tabelle 3, liegen die Simulationen gegenüber dem Bauteilversuch auf der sicheren Seite. Mit entsprechenden Modellen wurden bereits geplante aber experimentell noch nicht durchgeführte Pendelschlagversuche simuliert. Vor den Versuchen wurden die Simulationsergebnisse in [Br 04d], [Br 04e] dokumentiert und anschließend mit den Messergebnissen der Versuche verglichen. Da zum Zeitpunkt der Berechnung der Versuchsausgang noch unbekannt war, waren nachträgliche Modifikationen an den Rechenmodellen ausgeschlossen. Anhand des Vergleichs der Rechenergebnisse mit den Versuchsergebnissen wurde die Aussagequalität der Simulation bewertet. Von neun vorab rechnerisch bewerteten Geometrien wurden nur zwei als „absturzsicher“ eingestuft. Diese Glastafeln sind in den späteren Versuchen nicht gebrochen. Sieben Geometrien bestanden die rechnerische Simulation der Pendelschlagversuche nicht. Die Bauteilversuche haben jedoch alle geprüften Glastafeln bestanden, drei davon ohne Glasbruch. So ergaben die Simulationen sichere Prognosen. Ein Totalversagen einer Glastafel im Bauteilversuch, die mit einer qualifizierten Berechnung als absturzhemmend eingestuft wurde, ist bisher nicht bekannt. Dennoch wird die rechnerische Simulati-

¹⁶ In der FE-Methode bedeutet „transiente“ Berechnung einen Modellansatz, der im Zeitbereich vorübergehende bzw. instationäre also sich verändernde Zustände der Struktur abbilden kann. Beliebige nichtperiodische Erregungen, z. B. der Anprall des Stoßkörpers, können als Einwirkung auf das Modell einwirken.

on des Pendelschlagversuches von der Bauaufsicht noch nicht allgemein anerkannt. Von einigen Behördenvertretern wird bezweifelt, dass der Anwender die zahlreichen Annahmen, die für eine Pendelschlagsimulation getroffen werden müssen, konservativ berücksichtigt. Es hat sich gezeigt, dass unerfahrene Anwender mit der FE – Methode unzutreffende Ergebnisse berechneten. Die vorliegende Arbeit soll zeigen, wie ein geeignetes Modell aufgebaut sein muss, damit der Stoßvorgang realitätsnah abgebildet werden kann. Die erforderliche „Validierung“ erfolgt in mehreren Stufen. Das Vorgehen gliedert sich in folgende Einzelschritte:

In Abschnitt 3.2 werden die Eigenschaften des Stoßkörpers entsprechend DIN EN 12600 dargestellt. In Abschnitt 3.3 wird das Verhalten allseitig gelagerter Glastafeln unter Stoßeinwirkung bewertet.

Mit dem Ersatzmodell des Zweimassenschwingers werden Parameterstudien zum Stoßvorgang erstellt (3.4) mit denen sich die auftretenden maximalen Stoßkörperkräfte abschätzen lassen. Diese Werte dienen zur Kontrolle der Finite Elemente Berechnungen.

Des Weiteren wird ein Verfahren zur Überprüfung der Eignung eines FE-Modells zur Stoßsimulation (Benchmark) erarbeitet. Dies erfolgt schrittweise anhand der in Kapitel 3.5 beschriebenen Vorgehensweise. Berechnungsergebnisse müssen mit den gegebenen Versuchsdaten bzw. den daraus berechneten Trendlinien übereinstimmen. Mit einer solchen Validierung wird sichergestellt, dass weitere Simulationen mit diesem Modell wirklichkeitsnahe Ergebnisse erzielen. Sie können somit für einen rechnerischen Nachweis eingesetzt werden können.

Die Validierung der Modelle wird exemplarisch in den Kapiteln 3.6 und 3.7 anhand der Programme SJ MEPLA und LS-DYNA beschrieben. Davon ausgehend werden die berechneten Ergebnisse in Kapitel 3.8 gegenübergestellt. In Kapitel 3.6.4 werden Parameterstudien zu Glasaufbauten, Tafelgeometrien, Auftrefforten etc. vorgestellt.

Mit den Ergebnissen von Bauteilversuchen werden in Kapitel 3.9 für voll vorgespanntes Kalk-Natronglas Werkstoffkennwerte unter dynamischen Einwirkungen des Pendelschlages ermittelt. Das Verbundverhalten von VSG wird zusätzlich dargestellt.

Abschließend werden in Kapitel 3.9.3 die Berechnungsergebnisse den Ergebnissen von Bauteilversuchen gegenübergestellt.

3.2 Der Pendelschlagversuch nach DIN EN 12600

3.2.1 Stoßkörper

Vorgaben und Abweichungen

Bei absturzsichernden Glastafeln muss die Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung mit dem in DIN EN 12600 beschriebenen Pendel (Aufbau siehe Bild 3.2) nachgewiesen werden. Der Stoßkörper des Pendels besteht aus zwei luftgefüllten Reifen. Die Felgen dieser Reifen sind mit zusätzlichen Stahlteilen beschwert. Die Gesamtmasse des Stoßkörpers beträgt 50 kg.

Diese Massenangabe sowie der Reifenluftdruck von 4,0 bar entsprechen den Festlegungen der europäischen Norm.

Bei einer im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studie von Prüfberichten verschiedener Prüfanstalten fiel auf, dass die verwendeten Prüfkörper oft nicht den Vorgaben der DIN EN 12600 entsprechen. Häufig wurde die Umrüstung der Stoßkörpermasse von 45 kg auf 50 kg, die erst seit 2000 gefordert ist, mit Zusatzmassen realisiert (Metallscheiben angepasst an den bestehenden Durchmesser). Somit weichen die Stoßkörper-Geometrien häufig von den Vorgaben ab. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der mögliche Einfluss dieser Geometrieabweichung erstmals untersucht.

Zur Kontrolle des Einflusses der uneinheitlichen Massenträgheiten wurden von Bucak und Lorenz [Bu 04b] und [Bu 04a] Schwingversuche mit einem Stoßkörper nach DIN EN 12600 durchgeführt. Die Schwingzeiten wurden durch Zeitmessungen mit Lichtschrankenauslösung bestimmt. Die Bewertung der Messdaten erfolgt in dieser Arbeit in den Kapiteln 3.2.2 und 3.2.3.

Pendel (Vorgaben und Abweichungen)

In DIN EN 12600 wird die Pendellänge l_{ps} mit 1.500 mm vorgegeben. Werden Glastafeln auf der Baustelle geprüft, kann diese Vorgabe häufig aus geometrischen Gründen nicht eingehalten werden. Bei unterschiedlichen Pendellängen trifft der Stoßkörper mit unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten auf die Glastafel auf. Berechnungen mit unterschiedlichen Pendellängen zeigen lediglich in der Dekompressionsphase variierende Beschleunigungen des Stoßkörpers. Dieser Einfluss ist jedoch nicht bautechnisch relevant für die Bemessung von absturzsichernden Glastafeln.

Bei beengten Platzverhältnissen auf Baustellen ist es teilweise unmöglich, den Halterahmen des Pendels aufzubauen. Teilweise wurden auf Baustellen Aufhängepunkte des Stoßkörpers (Kranflasche, Gabel eines Gabelstaplers, angedübelte Konsolen etc.) gewählt, die nicht als unverschieblich angenommen werden können. Versuchsergebnisse solcher Versuche streuen zusätzlich infolge dieser Einflüsse.

3.2.2 Stoßkörpergeschwindigkeit

Im Folgenden wird der Einfluss der Massenverteilung des auf einer erzwungenen Kreisbahn schwingenden Stoßkörpers untersucht. Mit den Messwerten der Schwingversuche des Pendels in [Bu 04b] und [Bu 04a] wurden die in Tabelle 3.2 angegebenen Massenträgheitsmomente berechnet. Wird der Stoßkörper als Massenpunkt idealisiert, so kann mit Formel (3.1) die Auftreffgeschwindigkeit und mit Formel (3.2) die kinetische Energie des Stoßkörpers berechnet werden. Bild 3.1 belegt, dass für technische Beurteilungen der Absturzsicherung diese Annahme ausreichend genau ist.

$$v_{a0} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.1)$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_{sk} \cdot v_{a0}^2 \quad (3.2)$$

$$E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J_0 \cdot \omega^2 \quad (3.3)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
J_0	Massenträgheitsmoment	[kgmm ²]
E_{kin}	Kinetische Energie	[Nmm]
E_{rot}	Rotationsenergie	[Nmm]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Fallhöhe	[mm]
m_{sk}	Masse des Stoßkörpers (Pendel)	[kg]
v_{a0}	Anprallgeschwindigkeit	[m/s]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[m/s]

Die Pendellänge und das Massenträgheitsmoment gehen in die Berechnung der Schwingungsdauer mit ein (3.4). In den bisher vorliegenden Veröffentlichungen [Sc 98], [Sc 01], [Rü 02a] und [Bo 99] wurde der Stoßkörper bei Simulation des Pendelschlagversuchs als Massenpunkt idealisiert. In der vorliegenden Arbeit wird darüber hinaus auch der Einfluss der Massenträgheitsmomente untersucht. Die Videoauswertung der Versuche [Bu 04b] ergibt bei einer Pendellänge von 1500 mm auf eine Schwingungsdauer von über drei Sekunden. Es bestanden Zweifel an der Genauigkeit der Zeiterfassung und so wurden zusätzliche Versuche mit höherer Genauigkeit der Zeitmessung durchgeführt. In einer zweiten Versuchsserie erfolgte die Zeitmessung mit einer Lichtschrankenauslösung. In [Bu 04a] sind die Schwingungsdauern von acht Versuchen dokumentiert. Der Stoßkörper nach DIN EN 12600 konnte an einem 1,5 m langen Seil frei schwingen. Für diese Arbeit wurden die Messergebnisse nach minimaler, mittlerer und maximaler Schwingungsdauer ausgewertet und in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Ausgehend von diesen Messdaten wurde auf die Auftreffgeschwindigkeit des Stoßkörpers zurückgerechnet.

Tabelle 3.1: Schwingungsdauer des Pendels (8 Messungen)

Schwingungsdauer [s]		
minimale	mittlere	maximale
2,44	2,54	2,64

Die Schwingungsdauer für einen am masselosen Seil befestigten Massenpunkt kann nach [Ku 85] mit Formel (3.5) berechnet werden. Damit kann die Bahngeschwindigkeit des Pendels (Bild 3.1, v_{tra}) rückgerechnet werden. Mit der Formel (3.4) lassen sich mit den Messdaten aus

Tabelle 3.1 die Massenträgheitsmomente berechnen. Setzt man die potentielle Energie nach (2.1) und die Rotationsenergie nach (3.3) gleich, kann aus der gemessenen Schwingungsdauer die zugehörige Bahngeschwindigkeit v_{rot} berechnet werden. In Bild 3.1 sind die Bahngeschwindigkeiten für die in Tabelle 3.1 dargestellten Schwingungsdauern der Geschwindigkeit v_{tra} bei Annahme des Stoßkörpers als starrer Massenpunkt gegenübergestellt. Wird die Geschwindigkeit mit den zurückgerechneten Massenträgheitsmomenten aus der mittleren Pendeldauer der acht Messungen ermittelt, ergibt sich gegenüber der Berechnung mit der Annahme des starren Massenpunktes eine um 0,38 % kleinere Anfangsgeschwindigkeit. Auf Basis dieser geringen Abweichung kann in der rechnerischen Simulation des Pendelschlagversuchs, auf die Berücksichtigung des Massenträgheitsmomentes des Stoßkörpers verzichtet werden.

Physikalisches Pendel

$$T = 2 \cdot \Pi \cdot \sqrt{\frac{J_0}{m_{sk} \cdot g \cdot l_{PS}}} \quad (3.4)$$

Mathematisches Pendel

$$T = 2 \cdot \Pi \cdot \sqrt{\frac{l_{PS}}{g}} \quad (3.5)$$

Hierin ist:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
l_{PS}	Abstand des Aufhängepunkts vom Stoßkörperschwerpunkt	[mm]

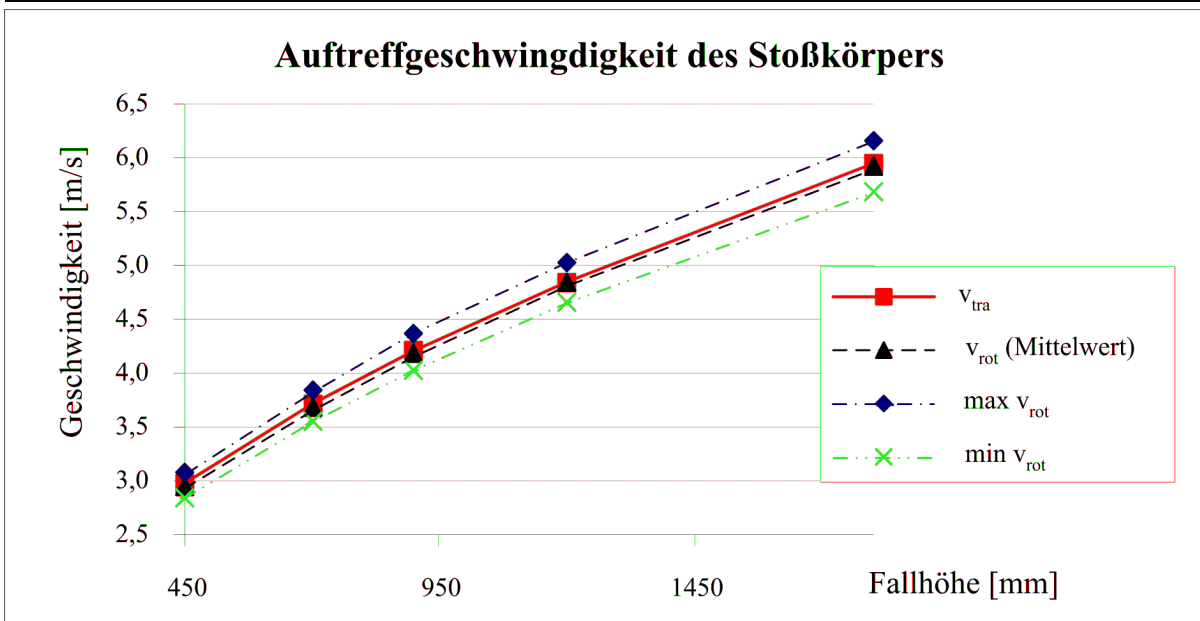


Bild 3.1: Auftreffgeschwindigkeit des Stoßkörpers

3.2.3 Trägheitsmoment des Stoßkörpers

Die rechnerische Ermittlung des exakten Massenträgheitsmomentes des Stoßkörpers ist aufwändig. Die Felgen haben verschiedene Einpressungen bzw. Löcher. Im Reifen sind Draht-einlagen usw.. Ziel ist hier dennoch eine Abschätzung des Massenträgheitsmomentes, damit entschieden werden kann, ob der Einfluss in der Simulation vernachlässigt werden kann.

In Bild 3.2 sind Ersatzkörper dargestellt, mit denen die Grenzwerte der Trägheitsmomente des Pendels abgeschätzt werden. Die Stoßkörpermasse wurde innerhalb der zulässigen geometrischen Vorgaben der DIN EN 12600 maximal nach innen bzw. außen verschoben. Die zugehörigen näherungsweise berechneten Trägheitsmomente sind in der Tabelle 3.2 zusammengefasst. Das Massenträgheitsmoment J_0 des Stoßkörpers (Bild 3.2 / 2, Achse in Blickrichtung) wurde aus dem Mittelwert der Schwingungsdauer von acht Pendelversuchen ([Bu 04a]) zurückgerechnet. Das berechnete Massenträgheitsmoment liegt zwischen den Grenzen aufgrund der möglichen geometrischen Lage der verteilten Massen. Damit ist belegt, dass die Schwingungszeiten der Tabelle 3.1 als realistisch angesehen werden können und die ermittelte Schwingungszeit auf der Basis von Videoauswertungen aus [Bu 04b] nicht ausreichend genau ist.

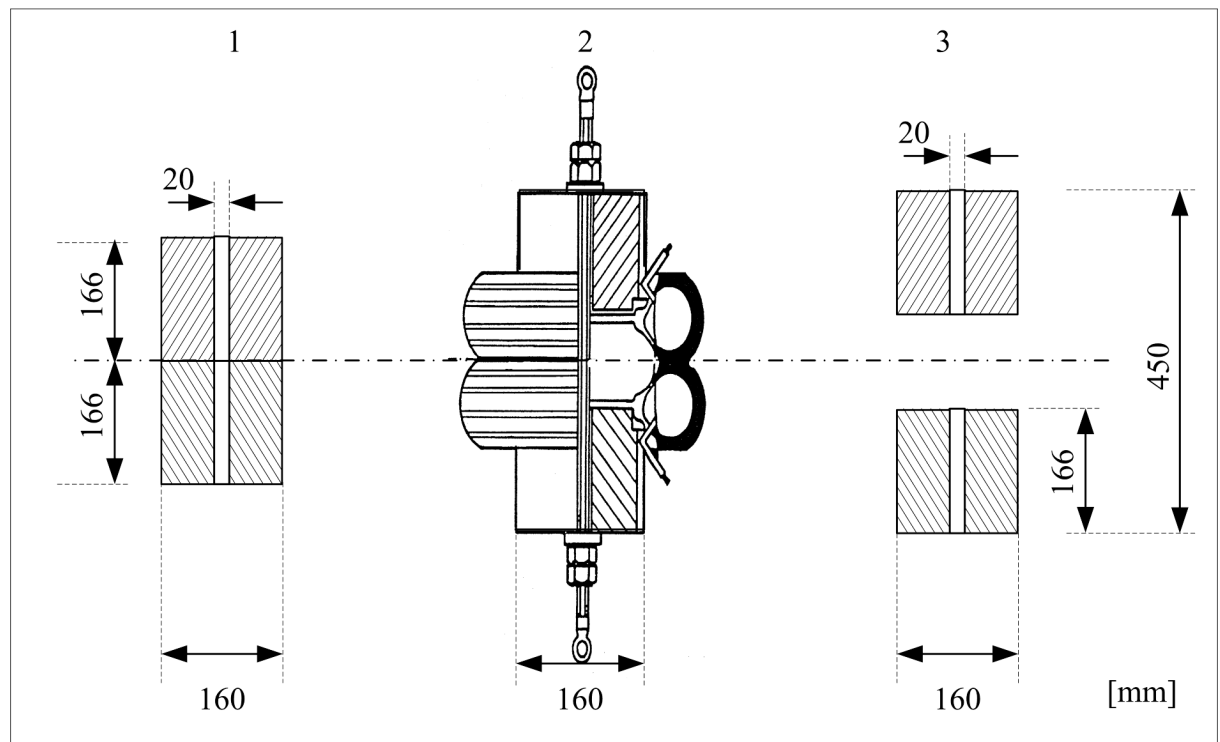


Bild 3.2: Massenträgheitsmomente des Stoßkörpers

Tabelle 3.2: Massenträgheitsmomente des Pendels

Min J_0	J_0 [Bu 04a]	Max J_0
542.852 kg mm ²	967.279 kg mm ²	2418.167 kg mm ²

3.2.4 Stoßkörpersteifigkeit

Schneider [Sc 01] hat die Federsteifigkeit c_{sk} der luftgefüllten Reifen des Stoßkörpers als linear mit einem konstanten Wert von 395.761 N/m abgeschätzt. Diese Federkonstante wurde aus Versuchen zurückgerechnet, bei denen der Stoßkörper gegen eine starre Wand gependelt wurde. Mit diesen Annahmen wurden die Bemessungstabellen in der E-TRAV für allseitig liniengelagerte Verglasungen erarbeitet. In [Rü 02a] wurde quasi statisch auf die Reifen gedrückt um die Federsteifigkeit zu ermitteln. Die Ergebnisse sind in Bild 5.3 dargestellt. Im Programm SJ MEPLA ist das Steifigkeitsverhalten des Stoßkörpers c_{sk} als nichtlineare Feder in Abhängigkeit von dessen Zusammendrückung w_{sk} entsprechend Gleichung (3.6) abgebildet worden.

$$c_{sk} = 300 + 2 \cdot |w_{sk}| \quad (3.6)$$

In Kapitel 5.2.5.2 sind die Federsteifigkeiten des Stoßkörpers nach DIN EN 12600 der Steifigkeit der Schulter zusammenfassend gegenübergestellt.

3.2.5 Kontaktfläche des Stoßkörpers

In [Rü 02a], Abschnitt 4.3.2.2 sind Kontaktflächen, in Abhängigkeit von einer statisch einwirkenden Kraft dokumentiert. Daraus lässt sich die Regressionsgleichung der Kontaktfläche A_{Pstoss} berechnen (3.7).

$$A_{Pstoss} = -0,7914 \cdot F_{Pstoss}^2 + 29,665 \cdot F_{Pstoss} + 0,5582 \quad [mm^2] \quad (3.7)$$

Hierin ist:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
$F_{Pstoß}$	Stoßkörperkraft	[kN]

3.3 Glastafeln unter stoßartiger Einwirkung

3.3.1 Dynamische Bauteilsteifigkeit unter Stoßeinwirkung

Die dynamische Steifigkeit oder „Federcharakteristik“ angestoßener plattenartiger Bauteile ist von der Anprallgeschwindigkeit abhängig. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Kraft-Verformungs-Kurve einer Platte keinen linearen Verlauf aufweist. Mit zunehmender Verschiebung des Auftrefforts nehmen die Membrantragwirkung der Platte und damit die Steifigkeit der Glastafel zu. Beim Menschenanprall entstehen Verschiebungen die größer sind als die Glastafeldicke. Dabei versteifen die nichtlinearen Membraneffekte die Glastafel in einer Größenordnung, die in Berechnungen berücksichtigt werden muss. Bei größeren Anprallgeschwindigkeiten nehmen die Stoßstellenverformungen zu [St 76]. Bei geeigneter Wahl der Elemente kann die FE – Methode das nichtlineare Tragverhalten, einschließlich der versteifenden Membraneffekte in der Platte, sowie das Schwingungsverhalten der Platte abbilden. Für diese Arbeit wurden die Programme LS-DYNA oder SJ MEPLA verwendet, die entsprechende nichtlineare Module für transiente Berechnungen des Stoßvorganges enthalten.

3.3.2 Schwingungsverhalten - Wellenausbreitung

3.3.2.1 Allgemeines

Rück hat in [Rü 02a], Abschnitt 3.3.1 mit Messungen und Berechnungen die Eigenfrequenzen in der Baupraxis üblicher Glastafeln bestimmt. Die Impulsbelastung des Stoßkörpers regt die Glasplatte in einem breiten Frequenzbandbereich an, sie schwingt daraufhin in einer Abfolge verschiedener Eigenformen. Der Stoßkörper kann mit der breitbandigen Einwirkung keinen Resonanzfall anregen.

„...Bei versuchstechnisch ermittelten Kontaktzeiten im Bereich von 40 bis 100 ms kann davon ausgegangen werden, dass das Tragwerk auf einen solchen Stoß im wesentlichen global antwortet und lokale Effekte von untergeordneter Bedeutung sind ...“ [Rü 02a].

Entgegen der Einschätzung von Rück beeinflussen jedoch gerade „lokale Effekte“, Nähe zum Lager, Art der Lagerung etc., der Wellenausbreitung das globale Schwingungs- und Verformungsverhalten der Glastafel. Nach dem Anprall schwingt die Glastafel in überlagerten Eigenschwingungsformen aus. Die Stoßcharakteristik beeinflusst die Beteiligungsfaktoren an der jeweiligen Schwingform.

Wird eine Platte angeschlagen, d. h. Energie mit einem kurzen Impuls eingeleitet, entstehen in ihr Longitudinal- und Transversalwellen. Diese Volumenwellen laufen mit werkstoffspezifischen Geschwindigkeiten durch das Kontinuum (Bild 3.3). Die Glasober- und Glasunterseite bilden Reflexionsflächen, an denen sich die Volumenwellen vielfach reflektieren. Dabei entstehen Plattenwellen (Lamb Waves) die instationäre Zustände durchlaufen und so die Platte zum Schwingen anregen. Während der Schwingungsphase werden symmetrische und antimetrische Wellenformen durchlaufen. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der Lamb Waves ist abhängig von der Frequenz der Anregung und der dabei eingetragenen Energie. Die Obergrenze stellt die Schallgeschwindigkeit im Glas dar. Damit können sich die Plattenwellen während der Kontaktzeit von ca. 50 ms der Stoßpartner selbst bei den größten produzierten Glasabmessungen (ca. 3.200 mm x 7.000 mm) mehrfach über die gesamte Glastafel ausbreiten.

Der Menschenanprall besteht aus vielen überlagerten Anregungen. Trifft ein Körper auf eine Glastafel auf, werden Trägheitskräfte aktiviert, die der Stoßkörperkraft entgegen gerichtet sind. Beim elastischen Stoß mit einem Menschen oder einem Stoßkörper nach DIN EN 12600 setzt sich diese Gesamtanregung aus unterschiedlichen Impulsen zusammen, die ein Frequenzband bilden. Dieser Anprall regt mehrere Volumenwellen an, die sich kreisförmig in radialer Richtung zentrisch um den Auftreffort ausbreiten und Schwingungen in der Glastafel hervorrufen. Die Wellenfront verbreitert sich aufgrund des dispersiven Verhaltens des Werkstoffs (Bild 3.3).

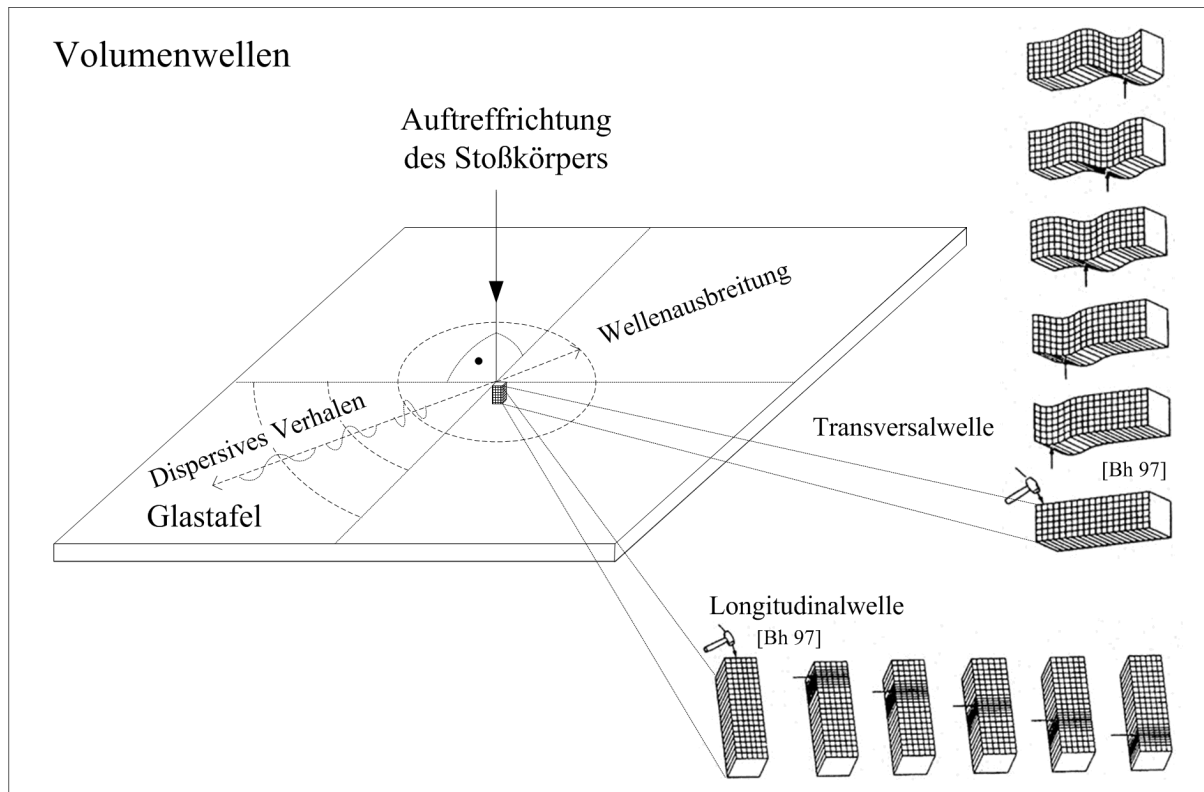


Bild 3.3: Primär- und Sekundärwellen in der Glastafel

Zur Erläuterung des Stoßvorgangs wird die Kompressions- und die Dekompressionsphase unterschieden. Beide Phasen werden im Folgenden zum Verständnis der Wellenausbreitung und der daraus resultierenden Schwingungen der Glastafel dargestellt.

3.3.2.2 Kompressionsphase

Die Kompressionsphase beginnt mit dem Kontakt beider Stoßpartner und endet wenn sich beide mit gleicher Geschwindigkeit $v_{sk} = v_{pk}$ in Stoßrichtung bewegen. Beim Stoß verformt sich die Glastafel unter der einwirkenden Stoßkörperkraft. Zusätzlich zur Verformung wird die Glastafel beschleunigt. Zerlegt man die Tafel gedanklich in endlich kleine Teilmassenelemente, so haben diese unterschiedliche Abstände zum Auftreffort. Jede Teilmasse erfährt infolge der zugehörigen Beschleunigung eine Trägheitskraft, die mit zunehmendem Abstand zeitversetzt aktiviert wird. Die Schwingungen breiten sich konzentrisch um den Auftreffort in radialer Richtung aus. Am Ende der Kompressionsphase ist der Stoßkörper maximal zusammengedrückt. Ein Teil der Stoßenergie ist damit als elastische Energie im verformten Stoßkörper gespeichert. Die Verformungen des Stoßkörpers sind bei elastischem Werkstoffverhalten reversibel. Dies gilt für den Stoßkörper nach DIN EN 12600 und auch für den Menschen bevor er sich plastisch verformt (Knochenbruch).

3.3.2.3 Dekompressionsphase

Nach vollständiger Verzögerung des Stoßkörpers dreht sich Bewegungsrichtung des Stoßkörpers um. Die Gründe für die Beschleunigung in gegengesetzter Richtung sind das Entspannen des Stoßkörpers (Reifen, siehe Bild 3.4, links) und ggf. auch die zum richtigen

Zeitpunkt zurückschwingende Glastafel. Schwingt die Glastafel ebenfalls gegen die Stoßrichtung (Bild 3.4, rechts) wird der Stoßkörper zusätzlich von dem Prüfkörper beschleunigt.

Die Dekompressionsphase endet mit der Trennung der beiden Stoßpartner. Schwingt die Glastafel mit einer hohen Frequenz, können sich die Stoßpartner nochmals oder mehrfach kurz berühren, bevor das Pendel zurückschwingt.

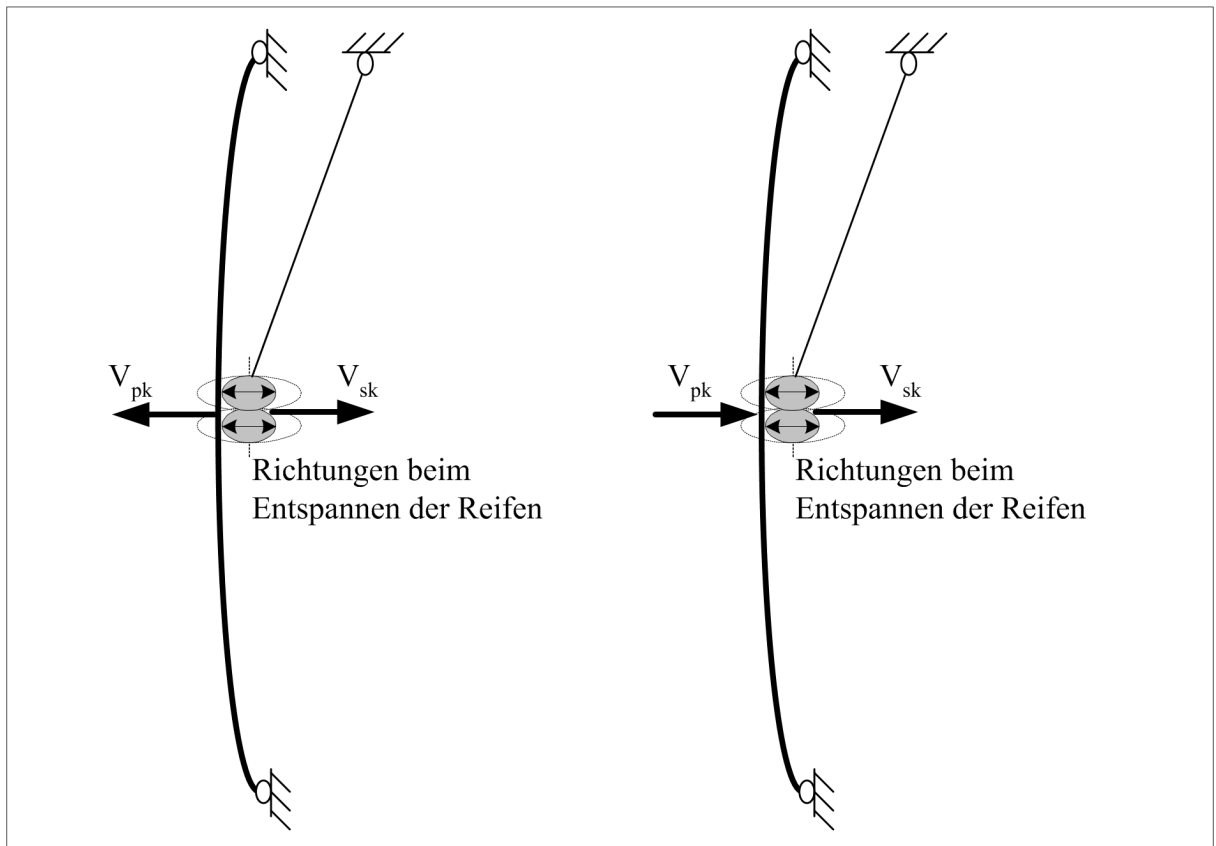


Bild 3.4: Bewegungsrichtungen während der Dekompressionsphase

Das Schwingungsverhalten der Glastafel wird auch von den sich ausbreitenden Wellen beeinflusst. Gemäß dem „Huygense Prinzip“ wird die Welle an einer Mediengrenze (Glastafelaußenflächen) reflektiert. Zeitweise überlagern sich verschiedene Wellen in der Glastafel, aufgrund lokaler Versteifungen (Faltwerk) schwingt die Glastafel in verschiedenen Schwingungsformen. Jeder Anprall eines Stoßkörpers erzeugt einen charakteristischen Stoßverlauf in der Glastafel, dieser kann mit einem linearen Ersatzmodell wie z. B. dem Zweimassenschwinger nicht in allen Fällen realitätsnah abgebildet werden.

Gegenüber einem Stoßkörper nach DIN EN 12600 ist der Mensch ein „schlafferer“ Stoßkörper. Er entspannt sich in der Dekompressionsphase langsamer, ein Beschleunigen und Zurückwerfen wie es der Zwillingssreifen erfährt, wurde bei Versuchen mit Menschen nicht beobachtet. Zusätzlich wird der Mensch wegen der Körperschwerpunktslage nach einem Anprall in der Regel schräg gegen die Glastafel gelehnt sein. Bild 3.5 zeigt die Karikatur eines anprallenden Menschen. Die zurückschwingende Glastafel drückt gegen die infolge der

Körperschräglage entstehende horizontale Kraftkomponente des Körpergewichts. Der Stoßvorgang wird deswegen gegenüber dem Stoßkörper nach DIN EN 12600 deutlich verlängert.

3.4 Simulation des Stoßes mit Ersatzmodellen

3.4.1 Allgemeines

Ein statisches Ersatzmodell ist zur Überprüfung von FEM - Ergebnissen hilfreich. Anhand der Ergebnisse von Parameterstudien können prinzipielle Effekte studiert und die Größenordnungen der auftretenden Kräfte und Beschleunigungen abgeschätzt werden. Stoßvorgänge können mit dem mechanischen Modell des Zweimassenschwingers, simuliert werden. Struck hat in [St 94] ein Zweimassenschwingermodell zur Simulation des Anpralls auf absturzsichernde Bauteile vorgeschlagen. Wörner und Schneider haben die Bewegungsdifferentialgleichungen für den Anprall des Doppelreifens auf Glastafeln allgemeingültig gelöst [Wö 00a]. Ausgehend von dieser bestand zunächst die Hoffnung, dass mit dem linearen Zweimassenschwingermodell (Bild 3.6) wirtschaftliche und sichere absturzhemmende Glastafeln bemessen werden könnten.

In dieser Arbeit wird ein Ersatzmodell erweitert, so dass auch die Energieanteile der beteiligten Stoßpartner beim Stoßvorgang ausgewertet werden können. Die Energieverteilung während des Stoßvorgangs ist für verschiedene Masse – Steifigkeitsverhältnisse in Bild 3.10 und Bild 3.11 dargestellt.

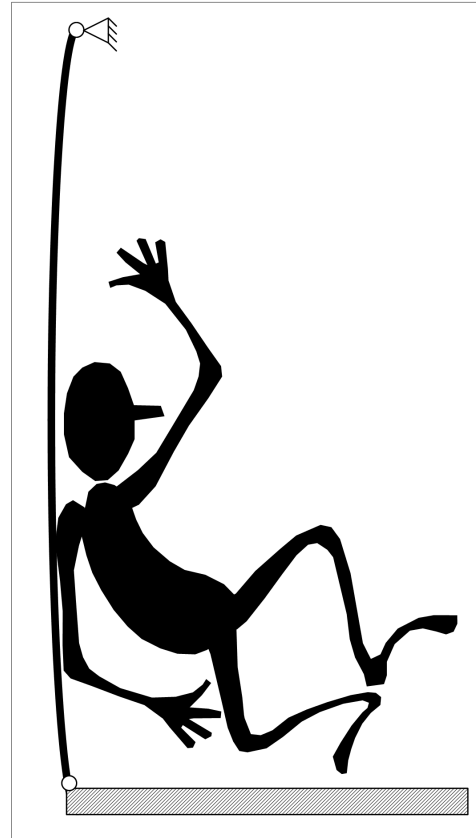


Bild 3.5: Anprall eines Menschen

3.4.2 Statisches Modell und Eingangswerte

Für eine Berechnung mit dem Zweimassenschwingermodell sind die in Tabelle 3.3 genannten Eingangswerte erforderlich. Aus der gewählten Fallhöhe h kann mit Formel (3.1) die Auftreffgeschwindigkeit des Stoßkörpers auf den Prüfkörper berechnet werden. Das statische Ersatzmodell des linearen Zweimassenschwingers ist in Bild 3.6 dargestellt.

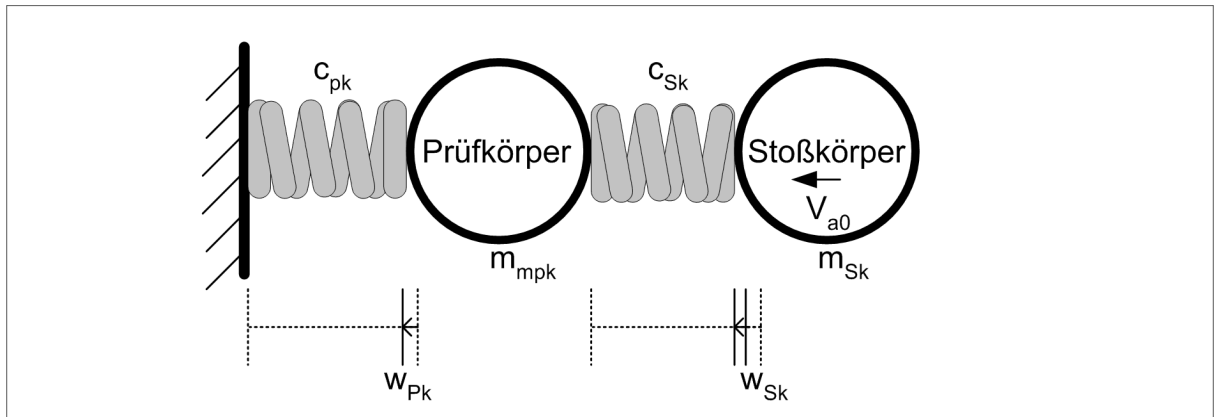


Bild 3.6: Statisches Modell des linearen Zweimassenschwingers

Tabelle 3.3: Eingangswerte für die Berechnung des Zweimassenschwingers

Parameter	Beschreibung	Einheit	Bemerkung
c_{pk}	Steifigkeit der Glastafel	[N/mm]	zu ermitteln
c_{sk}	Steifigkeit des Stoßkörpers	[N/mm]	[Sc 01]
m_{gpk}	generalisierte Masse des Prüfkörpers	[kg]	(3.9)
m_{mpk}	wirksame ¹⁷ Masse des Prüfkörpers	[kg]	zu ermitteln
m_{sk}	Masse des Stoßkörpers	[kg]	TRAV 6.2.2
v_{a0}	Anprallgeschwindigkeit	[m/s]	je nach Fallhöhe

3.4.2.1 Generalisierte Masse

Es gibt verschiedene Verfahren, die generalisierte Masse m_{gpk} zu ermitteln. In [St 76] werden hierzu durchgeführte Ausschwingversuche beschrieben. In [UEAtc 82], Anhang I ist folgender Zusammenhang angegeben:

$$m_{gpk} = K_{pk} \cdot \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 = \frac{K_{pk}}{\omega^2} \quad (3.8)$$

Hierin sind:

Parameter	Beschreibung	Einheit
K_{pk}	Anfangsbiegesteifigkeit des Prüfkörpers unter Einzel- last am Auftreffort des Stoßkörpers	[Nm]
T	Eigenschwingungsdauer des Prüfkörpers	[s]

¹⁷ Der generalisierte Einmassenschwinger schwingt energieäquivalent zum tatsächlichen System mit gleicher Frequenz und Amplitude. Die zugehörnde generalisierte Masse ist während der ganzen Schwingphase konstant. Beim Anprall des Stoßkörpers gegen die Glasplatte werden verschiedene Schwingformen durchlaufen, die in Schwingrichtung wirkende Masse wird nachfolgend als wirksame Masse bezeichnet.

Bei der quadratischen Platte mit vierseitig gelenkiger Lagerung wird als wirksame Masse in [Wö 00a] $m_{\text{gpk}} = 0,2 m_{\text{pk}}$ angegeben. Die generalisierte Masse m_{gpk} lässt sich gleichgesetzt, über ein Doppelintegral nach (3.9) berechnen:

$$m_{\text{gpk}} = \int_0^a \int_0^b \rho \cdot t \cdot w(x, y)^2 dx dy \quad (3.9)$$

Hierin sind:

Parameter	Beschreibung	Einheit
m_{gpk}	Generalisierte Masse der angestoßenen Glastafel	[kg]
t	Dicke des Prüfkörpers (Glasdicke)	[mm]
$w(x,y)$	Funktion der Verschiebung	[mm]
ρ	Rohdichte	[kg/m ³]

In der vorliegenden Arbeit wird das Doppelintegral näherungsweise als eine Doppelsumme mit der Fourierreihenentwicklung für eine Platte unter Einzellast mit 10 x 10 Feldern ausgewertet. Die Lösung der Fourierreihe geht auf Navier zurück und kann in [Sz 58] nachvollzogen werden. Mit Gleichung (3.10) lässt sich die Einheitsverschiebung w_0 der Platte unter einer Einzellast und damit die generalisierte Masse ermitteln.

$$w(x, y) = \frac{4F}{\pi^2 a b K_{pk}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi m x_0}{a} \sin \frac{\pi n y_0}{b} \sin \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi n y}{b}}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \quad (3.10)$$

Hierin sind:

Parameter	Beschreibung	Einheit
F	Einzelkraft an der Stelle des Auftreffortes	[N]
a	Höhe des Prüfkörpers (Glastafel)	[mm]
b	Breite des Prüfkörpers (Glastafel)	[mm]

In [Wö 00a], Abschnitt 5.1 wird angegeben: „... für den mittigen Stoß einer vierseitig gelagerten Glasscheibe $m_{\text{S,eff}} = 1/4 m_{\text{S}}$. Für alle anderen Anprallorte muß sich der Nutzer die mit-schwingende Masse selbst herleiten ...“

Der Auftreffort des Stoßkörpers verändert die generalisierte Masse einer Platte. Die Tafeldicke hat keinen Einfluss auf den Faktor η nach Gleichung (3.11), der das Verhältnis von wirksamer Masse zur Gesamtmasse beschreibt. Die wirksame Masse lässt sich für unterschiedlich große Glastafeln bei mittigem Auftreffort mit den Faktoren η aus Tabelle 3.4 berechnen.

Tabelle 3.4: Faktoren η zur Ermittlung der generalisierten Masse von allseitig liniengelagerten Rechtecktafeln bei mittigem Auftreffort

		Faktor η (Auftreffort Plattenmitte)					
		Tafelhöhe [mm]					
Tafelbreite [mm]		1000	1500	2000	3000	4000	6000
	300	0,24	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26
	500	0,22	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26
	1000	0,18	0,20	0,22	0,24	0,25	0,25
	1500	0,17	0,18	0,19	0,22	0,23	0,25
	2000	0,18	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24
	3200	0,28	0,19	0,17	0,18	0,19	0,21

Mit dem Faktor η aus Tabelle 3.4 für mittig angeschlagene Rechtecktafeln oder aus Tabelle 3.5 für eine 7,75 mm dicke Glastafel mit den Abmessungen 1.050 mm x 2.056 mm ($b \times h_G$) und verschiedenen Auftrefforten lässt sich nach (3.11) die generalisierte Masse m_{gpk} berechnen.

$$\eta = \frac{m_{gpk}}{m_{pk}} \quad (3.11)$$

Hierin sind:

Parameter	Beschreibung	Einheit
m_{gpk}	generalisierte Masse der angestoßenen Glastafel	[kg]
m_{pk}	Gesamtmasse des Prüfkörpers (Glastafel)	[kg]

Die Lage des Auftrefforts des Stoßkörpers bei einer Glastafel hat Einfluss auf die generalisierte Masse. Dies ist bei der Wertung von Versuchsergebnissen zu beachten.

Tabelle 3.5: Faktor η zur Berechnung der generalisierten Masse einer rechteckigen Glastafel, allseitig liniengelagert, mit den Abmessungen 7,75 x 1.050 x 2.056 mm ($t \times b \times h_G$)

		Faktor η				
		Auftreffort (y-Koordinate) [mm]				
Auftreffort (x-Koordinate) [mm]		250	500	850	1.028	1.150
	250	0,56	0,26	0,26	0,32	0,26
	300	0,54	0,26	0,26	0,32	0,26
	400	0,93	0,26	0,27	0,38	0,26
	525	0,18	0,25	0,25	0,21	0,25

Für einige Verbund-Sicherheitsglastafeln aus der Tabelle 2 der TRAV wurden die generalisierten Massen berechnet. Die Ergebnisse für den Auftreffort Tafelmitte (siehe Bild 3.7) sind in Tabelle A 4.4 zusammengestellt. In Tabelle A 4.5 wurden der Auftreffort bei jeweils einem Drittel der Breite und Höhe gewählt (siehe Bild 3.8). Die Massen- und Steifigkeitsverhältnisse gleicher Tafelabmessungen weichen hier von den Verhältnissen bei mittigem Auftreffort ab. Als Auftrefforte werden bei Bauteilversuchen üblicherweise nur die Randnähe (250 mm Abstand bis zu einem Linienlager), die Tafelecke und die Tafelmitte gewählt. Dies führt nicht immer zu konservativen Ergebnissen. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten zahlreichen Kontrollberechnungen wurden mit Auftrefforten bei einem Drittel der Kantelänge größere Beanspruchungen im Glas berechnet als beim Anprall auf die Tafelmitte [Br 04e].

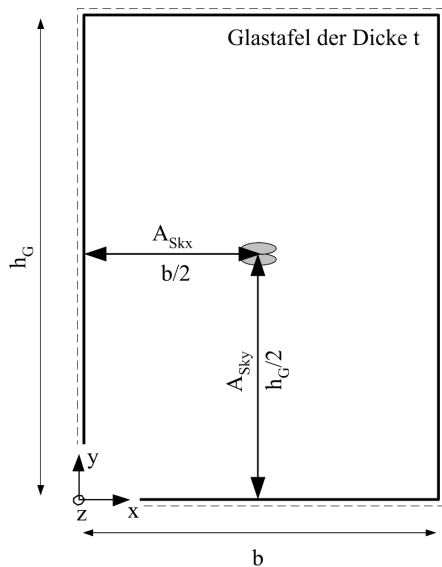


Bild 3.7: Skizze der Eingangswerte für Tabelle

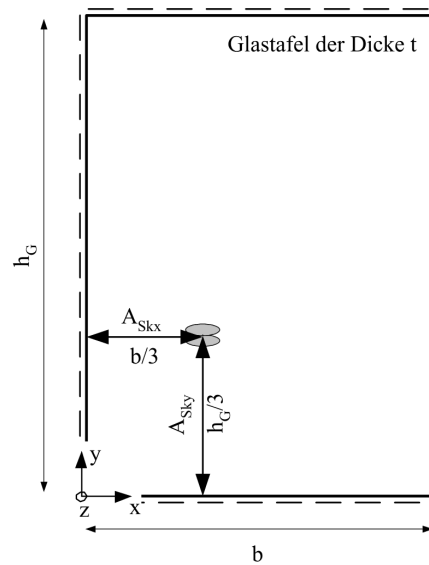


Bild 3.8: Skizze der Eingangswerte für Tabelle

3.4.2.2 Glastafelsteifigkeit

Mit der Gleichung (3.10) lässt sich die Steifigkeit des Prüfkörpers auf der Basis der linearen Plattentheorie berechnen. Während des Stoßes verändert sich die Steifigkeit der Glastafel infolge des Membraneffekts sowie der Versteifung infolge des Schwingungsverhaltens (siehe Kapitel 3.3.1). Diese nichtlinearen Effekte können mit dem Ersatzmodell des linearen Zweimassenschwingers nicht berücksichtigt werden.

3.4.3 Berechnungen mit dem Zweimassenschwingermodell und Wertung der Ergebnisse

3.4.3.1 Parameterstudien

Das in [Wö 00a] vorgestellte lineare Ersatzmodell des Zweimassenschwingers, analog Bild 3.6, kann die Charakteristik und Auswirkungen des Anpralls näherungsweise beschreiben. Bei der Berechnung mit dem Zweimassenschwingermodell können vier Parameter – jeweils die Massen und die Steifigkeiten der Stoßpartner – variiert werden.

Menschen als Stoßkörper weisen verschiedene Massen und „Schultersteifigkeiten“ auf. In Tabelle A 4.1 im Anhang werden die Einflüsse dieser unterschiedlichen Stoßkörpereigenschaften aufgezeigt. Bei Simulation des Stoßkörpers nach DIN EN 12600 werden dem Stoßkörper die Eigenschaften Steifigkeit $c_{pk} = 395.761 \text{ [N/m]}$ und generalisierte Masse $m_{gpk} = 50 \text{ [kg]}$ zugewiesen. Mit der Zunahme der Masse und / oder der Steifigkeit des Stoßkörpers werden die Kräfte größer, die auf den Prüfkörper einwirken. Der gleiche Effekt zeigt sich auch bei den Energieanteilen (Tabellen im Anhang A 4.1 bis A 4.3).

In Tabellen A 4.3 sind die Berechnungsergebnisse einer Parameterstudie mit verschiedenen generalisierten Massen der Glastafel und verschiedenen Stoßkörpersteifigkeiten dargestellt. Die Fallhöhe wird einheitlich mit 450 mm und die Prüfkörpersteifigkeit mit 395.761 N/m angenommen. Mit der Zunahme der Masse werden größere Trägheitskräfte berechnet.

Die in den Tabellen im Anhang A 4.1 bis A 4.3 dargestellten Energieanteile sind auf die potentielle Energie des Stoßkörpers vor dem Auslösen bezogen. Die in die Glastafel in Summe eingeleitete Energie ist mit E_{sum} gekennzeichnet. Diese Energiemenge setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, den Energieanteil E_{elast} infolge elastischer Durchbiegung bezeichnet und die Teilenergie E_{kin} infolge der Beschleunigung. Die beschriebenen Anteile verändern sich während des Stoßverlaufes. In den Tabellen sind nur die Maximalwerte angegeben. Eine zeitliche Zuordnung zur Stoßphase ist mit dieser Auswertung nicht möglich. Die maximal in der Glastafel elastisch gespeicherte Energie bzw. der kinetischen Energie treten zu unterschiedlichen Stoßzeiten auf (siehe Bild 3.11). Bei leichten Prüfkörpern ist die elastisch gespeicherte Energie infolge Verformung der maßgebende Anteil. Dabei liegen die Zeitpunkte der maximalen Durchbiegung der Glastafel und der Umkehrzeitpunkt des Pendels während des Stoßes nahe beisammen.

Die Einflüsse des Prüfkörpers sind in Tabelle A 4.2 zusammengestellt. Analog zum Stoßkörper steigen die auf den Prüfkörper einwirkenden Kräfte mit der Zunahme seiner Masse und oder seiner Steifigkeit. Auf schwerere Prüfkörper wird weniger Energie vom Stoßkörper übertragen als bei leichteren. Mit der Zunahme der Prüfkörpermasse steigen die beim Stoß entstehenden Trägheitskräfte.

In Tabelle A 4.2 sind die Berechnungsergebnisse einer Studie mit verschiedenen generalisierten Massen der Glastafel und Steifigkeiten des Prüfkörpers dargestellt. Die Fallhöhe wird einheitlich mit 450 mm und die Prüfkörpersteifigkeit mit 395.761 N/m angesetzt. Verändert werden die Steifigkeiten des Stoßkörpers und die generalisierte Masse des Prüfkörpers. Mit der Zunahme der Masse werden größere Trägheitskräfte berechnet. Bei „schweren“ Glastafeln mit Massen über 100 kg liegen die Trägheitskräfte, die beim Anprall des Stoßkörpers aktiviert werden, in der Größenordnung der Kräfte, die vom Stoßkörper auf die Glastafel wirken. Der übertragene Energieanteil ist im Vergleich zu leichteren Glastafeln geringer.

3.4.3.2 Stoßkörperkräfte

Jeder Eingangswert aus Tabelle 3.3 beeinflusst den Stoßverlauf. Bei allseitig gelagerten rechteckigen Glastafeln repräsentiert jeder unterschiedliche Auftreffort einen anderen Stoß, sofern nicht infolge der Symmetrie mechanische identische Verhältnisse vorliegen. Dies ist beim rechnerischen Nachweis und der Übertragung von Versuchsergebnissen auf andere Geometrien zu beachten. Fehlinterpretationen lassen sich nur vermeiden, wenn die Ergebnisse gleichartiger Stöße verglichen werden. Mit einem Zweimassenschwingermodell wurden für viele Massen- und Steifigkeitsverhältnisse die Zeit-Weg-Kurven der Stoßpartner berechnet. Die Ergebnisse sind im Anhang A 8 dargestellt. In den Anhängen A 5 und A 6, sind Tabellen zur entstehenden Stoßkörperkraft enthalten.

In den von Wörner und Schneider veröffentlichten Ersatzlasttabellen [Wö 00a], Abschnitt 5.2 wurden die entstehenden Stoßkraftkomponenten über die Stoßzeit nicht konsequent zugeordnet. So wurde aus Überlagerung der Maximalkomponenten die größte Stoßkörperkraft beim Schlag gegen die starre Wand mit 29 kN bei einer Fallhöhe von 450 mm angegeben. In der vorliegenden Arbeit wurde die Parameterstudie nochmals gegengerechnet. Die auf den Stoß-

körper wirkenden Kräfte sind im Anhang A 5 dokumentiert. Der Maximalwert der Kontaktkraft beim Stoßkörperanprall gegen eine starre Wand wurde mit 13,2 kN berechnet und liegt damit in der von [Sc 01] in Abschnitt 10.2.1 angegebener Größenordnung. Schneider hat eine maximale Pendelbeschleunigung mit 279 m/s^2 gemessen. Hieraus errechnet sich mit der Beschleunigung und der Stoßkörpermasse eine Stoßkörperkraft von $F_{\text{Pstoss}} = 13,9 \text{ kN}$.

Wie könnte eine absturzhemmende Glastafel mit linearen Ersatzmodellen nachgewiesen werden?

Zuerst muss mit dem linearen Zweimassenschwingermodell die Veränderung der Stoßkörperkraft über die Zeit $F_{\text{Pstoß}}(t)$ während des Anpralls berechnet werden. In der anschließenden Dimensionierung der absturzhemmenden Glastafel werden die auftretenden Spannungen unter der maximalen Stoßkörperkraft berechnet. Dazu wird eine statische Ersatzlast auf ein Plattenmodell aufgebracht.

Mit dieser Methode werden nachfolgend zwei Glastafeln mit nahezu gleicher Masse, jedoch mit unterschiedlicher Geometrie nachgewiesen. Die generalisierte Masse und die lineare Federsteifigkeit des Prüfkörpers wurden nach den Gleichungen (3.9) und (3.10) mit der dargestellten Fourierreihenentwicklung berechnet:

- Rechteckige Tafel mit den Abmessungen $4 \text{ mm} \times 3.200 \text{ mm} \times 6.400 \text{ mm}$ ($t \times b \times h_G$), Auftreffort bei $250 \text{ mm} \times 1.000 \text{ mm}$. Als Eingangsparameter für das Zweimassenschwingermodell ergeben sich eine generalisierte Masse $m_{\text{gpk}} = 80,22 \text{ kg}$ und eine Steifigkeit $c_{\text{pk}} = 15,57 \text{ Nm}$.
- Quadratische Glastafel mit einer Kantenlänge von 4.000 mm und einer Dicke¹⁸ von 11 mm bei mittigem Auftreffort des Stoßkörpers (zentrischer Stoß). Generalisierte Masse $m_{\text{gpk}} = 80,09 \text{ kg}$ und eine Steifigkeit $c_{\text{pk}} = 55,69 \text{ Nm}$.

Mit dem Zweimassenschwingermodell wurde eine maximale Stoßkörperkraft von $10,39 \text{ kN}$ für die Rechteckplatte und $10,41 \text{ kN}$ für die Quadratplatte berechnet. Bei beiden Berechnungen wurden die maximalen Wege der Prüfkörperverschiebung am Auftreffort mit $62,8 \text{ mm}$ berechnet. Diesen Ergebnissen werden Berechnungen mit FE – Modellen (SJ MEPLA, Kapitel 3.6) gegenübergestellt. Dabei wird das reale (nichtlineare) Verformungsverhalten der Platte abgebildet. Unter Stoßeinwirkung wurde die maximale Stoßkörperkraft bei der Rechteckplatte mit $7,0 \text{ kN}$ und bei der Quadratplatte mit $7,5 \text{ kN}$ berechnet. Die maximale Plattenverformung mit $46,9 \text{ mm}$ tritt bei der Quadratplatte 76 ms nach dem Erstkontakt auf. Die Rechteckplatte ist nach 32 ms mit $39,1 \text{ mm}$ maximal ausgelenkt. Die Stoßkörperkräfte wie die Verschiebung werden für diese Beispiele mit dem Zweimassenschwinger überschätzt.

Wirkt die mit dem linearen Zweimassenschwingermodell berechnete maximale Stoßkörperkraft als statische Einzellast auf die Platte, errechnen sich im gewählten Beispiel um 20% höhere Biegezugspannungen, als bei der transienten Analyse des Stoßvorgangs, bei dem die Stoßkörperkraft den gleichen Wert annimmt. Nach Meinung des Autors lassen sich somit auf

¹⁸ Diese Glasdicke ist am Markt nicht erhältlich.

Basis des linearen Zweimassenschwingermodells absturzhemmende Glastafeln nicht wirtschaftlich und sicher dimensionieren.

Ferner kann die häufig getroffene Annahme, dass eine Platte sich unter den dynamischen Lasten des Pendels affin zur statischen Lösung verformt, nicht bestätigt werden. Beschränkt auf die Kompressionsphase kann diese Annahme qualitativ gelten. Bei der beschriebenen Rechteckplatte mit 3.210 mm x 6.400 mm erhält man in der Kompressionsphase nach 16 ms eine Plattenverformung von 24,1 mm bei einer Pendelkraft von 4,7 kN. Wird diese Einwirkung als statische Last auf eine Einwirkungsfläche von 200 mm x 200 mm verteilt aufgebracht und geometrisch nichtlinearere Effekte berücksichtigt, werden rund 50 % größere Verformungen berechnet.

Als weiteres Anwendungsbeispiel des Zweimassenschwingermodells wird eine allseitig liniengelagerte rechteckige Glastafel aus ESG mit den Abmessungen 1.050 mm x 2.056 mm und einer Nenndicke von 8 mm gewählt. Auf diese wurden von Rück [Rü 99a][Rü 02a] zahlreiche Pendelschläge ausgeführt. Die tatsächliche Glasdicke wurde mit 7,75 mm gemessen. Bei einem der Versuche wurden auch Dehnungen an der Glasoberfläche gemessen. Die daraus berechneten Biegezugspannungen sind in Tabelle A 16.9, Zeile 1 dokumentiert. Ausgehend von den geometrischen Angaben wurde über eine Fourierreihenentwicklung die Verformung der Platte unter Einzellast, die Steifigkeit (Tabelle A 16.9, Zeile 2) und unter der Annahme, die Biegeverformung entspricht in erster Näherung der Schwingeigenform, die generalisierte Masse ermittelt. Mit diesen Eingangsdaten wurden mit dem Zweimassenschwingermodell die Pendelkräfte (Tabelle A 16.9, Zeile 3) und die Verformungen ermittelt. Diese Pendelkräfte wurden in die Berechnungen mit SJ MEPLA (Platte mit Einzellast, Lastverteilung 200 mm x 200 mm) eingesetzt (Tabelle A 16.9, Zeile 4 und 5).

Mit einem realistischen FE – Modell werden in diesem Beispiel bei der dynamischen Simulation des Pendelschlags mit SJ MEPLA eine 98 % größere Stoßkörperkraft berechnet (Tabelle A 16.9, Zeile 7) als mit dem Zweimassenschwingermodell abgeschätzt wurde. Für Dimensionierungsaufgaben in der Praxis sollte das Zweimassenschwingermodell nur mit Vorsicht verwendet werden. Bei ungeeignetem Einsatz könnte eine scheinbare Tragsicherheit ausgewiesen werden. In ausgewählten Fällen wird das Ersatzmodell zur Klärung spezieller Fragestellungen in dieser Arbeit dennoch weiter verwendet. Z. B. zur Abschätzung der maximalen Stoßkörperkraft beim Anprall gegen die starre Wand oder der prinzipiellen Energieverteilung bei verschiedenen Steifigkeiten der Stoßpartner.

Es fällt auf, dass die aus den Versuchsergebnissen zurückgerechnete Stoßkörperkraft (Tabelle A 16.9, Zeile 1) 19 % kleiner ist als die berechnete Kraft (Tabelle A 16.9, Zeile 7). Dem Berechnungsmodell liegt ein starrer Prüfrahm zugrunde. Damit wird eine größere Stoßkörperkraft berechnet. Der Prüfrahm bestand aus mehreren zusammengesetzten Profilen. Er war mit Diagonalen abgestützt. Der Aufbau des Prüfrahmens der Versuche ist in [Rü 02a] nur ungenügend dokumentiert. Über die tatsächliche Steifigkeit kann nur spekuliert werden. Um keine falsche Berechnungsgenauigkeit vorzutäuschen werden eindeutige (starre) Lagerbedingungen gewählt.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass der Nachweis der Tragfähigkeit einer Glastafel unter Anprall auf der Basis eines vereinfachten Ersatzmodells nur sicher ist, wenn die Fallhöhe derart gesteigert wird, dass sämtliche Unsicherheiten abgedeckt sind. Auf der Basis des Zweimassenschwingers lässt sich kein wirtschaftliches Bemessungskonzept für Glastafeln entwickeln.

3.4.3.3 Energieübertragungsmechanismen beim Stoß

Überlegungen zur Energieübertragung zwischen unterschiedlichen Stoßkörpern finden sich in [St 78] Abschnitt 3. „... Energieübertragungsfaktoren beim Schulterstoß zu denen bei Stoß mit sphärokonischem Glaskugelsack bei Ausschnitten leichter Trennwände ...“ wurden untersucht. Den ermittelten Faktoren liegen Massen- und Steifigkeitsverhältnisse von Fachwerk-wänden, Leichtskelettwänden in Ständerbauart zu Grunde. Für eine Anwendung im Glasbau sind die Angaben ungeeignet. Die Fragestellung, wie sich die Energie vom Stoßkörper auf den Prüfkörper überträgt, wird vorab im Rahmen der vorliegenden Arbeit geklärt, um einen brauchbaren Bemessungsvorschlag erarbeiten zu können.

Nachfolgend werden Energieübertragungsvorgänge vom Stoßkörper auf den Prüfkörper für verschiedene Massen- und Steifigkeitsverhältnisse mit dem Zweimassenschwingermodell untersucht. An ausgewählten Beispielen (starre Wand) stimmen die Berechnungen überein und die Energieübertragungsmechanismen lassen sich mit dem Zweimassenschwingermodell einfach untersuchen und für alle Teilenergien der Stoßpartner getrennt darstellen. Die ausgewerteten Berechnungsergebnisse dienen zum Verständnis der prinzipiellen Einflussfaktoren. Auf die einzelnen Energieanteile während des Stoßverlaufs kann über die Geschwindigkeiten (kinetische Energie) und Verformung (elastische Energie) zurückgerechnet werden.

Die sich verformende Glastafel kann vereinfacht als lineare Feder idealisiert werden (Bild 3.12). Die bei einer Verformung im Bauteil gespeicherte elastische Energie wird nach Gleichung (3.12) berechnet.

$$E_{\text{elast}} = \frac{c_{\text{pk}} \cdot w_{\text{pk}}^2}{2} \quad (3.12)$$

Wird die angestoßene Glastafel beschleunigt, nimmt sie zusätzlich Bewegungsenergie auf.

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{gpk}} \cdot v_{\text{pk}}^2 \quad (3.13)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
c_{pk}	Steifigkeit der Glastafel unmittelbar vor dem Stoß (Prüfkörper)	[N/mm]
E_{elast}	Im Bauteil elastisch gespeicherte Energie	[Nmm]
E_{kin}	Kinetische Energie	[Nmm]
m_{gpk}	generalisierte Masse der angestoßenen Glastafel	[kg]

v_{pk}	Geschwindigkeit des Prüfkörpers (Glastafel)	[m/s]
w_{pk}	Verformung der Glastafel unter Stoßeinwirkung	[mm]

Die Energieübertragung starrer Körper lässt sich mit „Energieellipsen“ veranschaulichen, wenn die kinetischen Energien (3.13) der beiden Stoßpartner gleichgesetzt werden und die entstehende Gleichung nach der Geschwindigkeit aufgelöst wird [Sz 58]. In einem $v_{sk} - v_{pk}$ – Koordinatensystem wird die Energieverteilung veranschaulicht. Aus dem Energieerhaltungssatz folgt:

$$v_{pk} = \sqrt{\frac{2E_{k0}}{m_{gpk}} - v_{sk}^2 \frac{m_{sk}}{m_{gpk}}} \quad (3.14)$$

E_{k0} : Kinetische Energie des Stoßkörpers unmittelbar vor dem Anprall auf den Prüfkörper. Dies entspricht der Lageenergie vor dem Auslösen des Stoßvorgangs.

Am Ende der Kompressionsphase berechnet sich die kinetische Energie nach (3.15).

$$E_{kin} = (m_{sk} + m_{gpk}) \frac{v_{sk}^2}{2} \quad (3.15)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
E_{k0}	Kinetische Energie unmittelbar vor dem Anprall des Stoßkörpers	[Nmm]
m_{sk}	Masse des Stoßkörpers	[kg]
v_{sk}	Geschwindigkeit des Stoßkörpers	[m/s]

Das Vorgehen wird in einem Beispiel verdeutlicht:

Beim Pendelschlagversuch mit einer Fallhöhe von 450 mm unter der Annahme, dass das Pendel und die Glastafel die gleiche Masse haben und ideal starr sind, ergibt sich im Geschwindigkeiten-Diagramm eine Ellipse. Bei 450 mm Fallhöhe erreicht der Stoßkörper eine maximale Geschwindigkeit von 2,97 m/s. Die Kurve der beiden starren Stoßpartner ist in Bild 3.9 mit „starr 50-50“ bezeichnet. Im Schnittpunkt mit der Winkelhalbierenden, die in Bild 3.9 gestrichelt und mit „ $v_{pk} = v_{sk}$ “ gekennzeichnet ist, haben beide Körper die gleiche Geschwindigkeit. Beim elastischen Stoß kennzeichnet sie zugleich die Trennung zwischen der Kompressionsphase - hier ist der Stoßkörper schneller als der Prüfkörper – von der Dekompressionsphase.

Bei elastischen Stoßpartnern mit gleicher Masse (50 kg) und gleicher Steifigkeit (395.761 N/m) kann ein Teil der Energie in der Formänderung der Körper gespeichert bleiben. Durch die Verformung des Stoßkörpers und die Verformung der Glastafel wird Formänderungsenergie in den Stoßpartnern gespeichert. Die Energie des Stoßkörpers wird unvollständig auf den Prüfkörper übertragen, da er einen Teil in seiner Verformung speichert. Des-

wegen erreicht die Glastafel in diesem Beispiel nur eine geringere Geschwindigkeit als die Auftreffgeschwindigkeit des Stoßkörpers. Wertet man das Stoßereignis mit dem Zweimassenschwingermodell unter Berücksichtigung der Steifigkeiten aus, ergibt sich die in Bild 3.9, mit „50-50“ gekennzeichnete Geschwindigkeitsverteilung. Die Glastafel hat infolge der Verformung elastische Energie und infolge der Beschleunigung kinetische Energie gespeichert. Der zurückschwingende Stoßkörper enthält ebenfalls kinetische Energie und aufgrund des Energieerhaltungssatzes ist der restliche Energieanteil in der Stoßkörperdeformation gespeichert. Die Höhe der einzelnen Energieanteile wird nachfolgend ausgewertet.

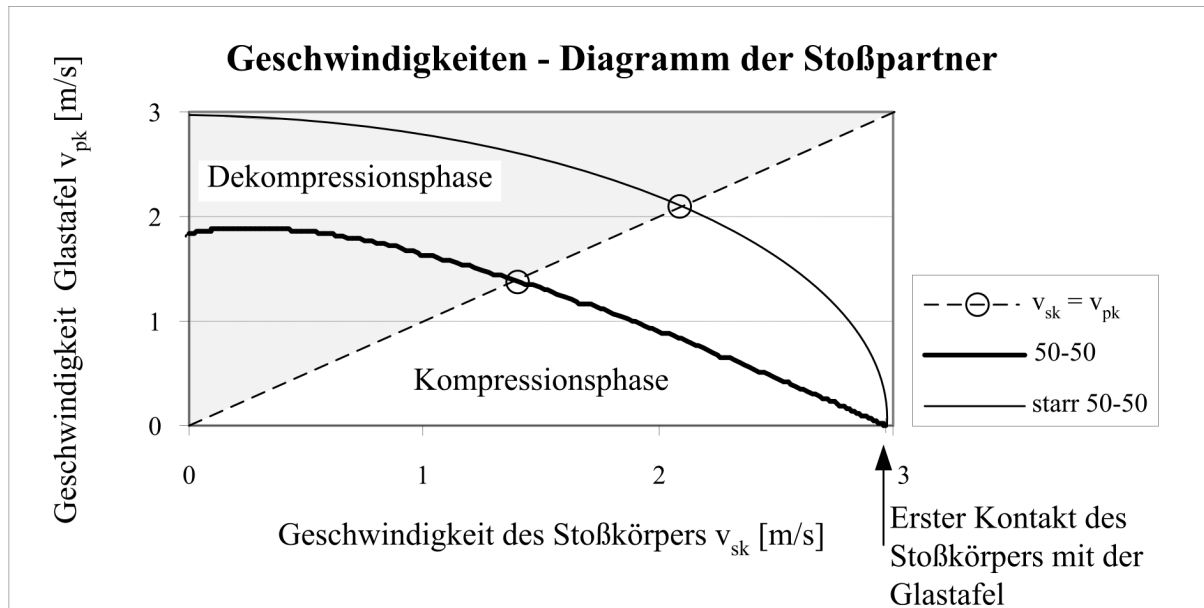


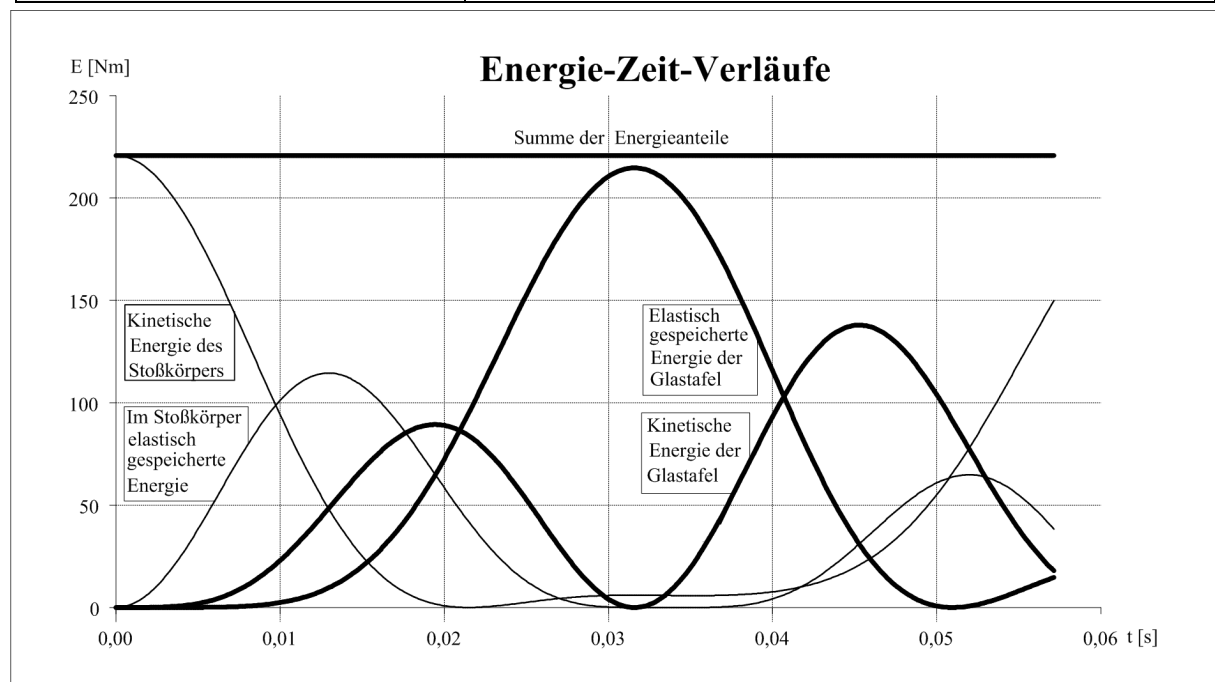
Bild 3.9: Energieübertragungsmechanismen starrer und elastischer Stoßkörper

3.4.3.4 Energieverteilung beim Stoßvorgang

Das in [Sc 01] Abschnitt 12.2.3 vorgestellte Modell des Zweimassenschwingers wurde für die vorliegende Arbeit dahingehend erweitert, dass sich zusätzlich die elastisch gespeicherten und die kinetischen Energieanteile jeweils für die Glastafel und das Pendel getrennt auswerten lassen. Exemplarisch ist dies für zwei Beispiele dargestellt. Im ersten Beispiel werden die Massen und die Steifigkeiten der Stoßpartner entsprechend denen des Pendels nach DIN EN 12600 gleich gesetzt ($c_{pk} = c_{sk}$, $m_{pk} = m_{sk}$). Die Eingangswerte der Berechnung sind in der Tabelle 3.6 zusammengefasst. Das berechnete Ergebnis ist in Bild 3.10 dargestellt. Der Stoßkörper ist nach ca. 0,03 Sekunden vollständig verzögert. Die kinetische Energie des Pendels wird in elastische Verformungsenergie der Reifen sowie kinetische und elastische Energie in der Glastafel transformiert. Die Summe aller vier Anteile ist konstant, da der Energieerhaltungssatz gilt.

Tabelle 3.6: Eingangswerte Beispiel 1

Prüfkörper (Glastafel)	
Generalisierte Masse der Glastafel [kg]	50
Ersatzsteifigkeit der Glastafel [N/m]	395.761
Stoßkörper (DIN EN 12600)	
Masse des Stoßkörpers [kg]	50
Ersatzsteifigkeit des Stoßkörpers [N/m]	395.761
Fallhöhe [m]	0,45

Bild 3.10: Energieanteile beim Stoßvorgang, gleiche Massen und Steifigkeiten: $c_{pk} = c_{sk}$, $m_{pk} = m_{sk}$

Im zweiten Beispiel wurde ein geringerer Luftdruck im Reifen simuliert. Die Steifigkeit des Stoßkörpers wurde gegenüber den Untersuchungen von Schneider [Sc 01] halbiert (siehe Tabelle 3.7). Dabei wird der weichere Stoßkörper stärker zusammengedrückt und speichert dabei mehr Energie infolge der elastischen Verformung. Entsprechend wird weniger Energie auf den Prüfkörper übertragen, vergleiche Bild 3.10 und Bild 3.11. Beim Bauwerk hat die Steifigkeit der Unterkonstruktion einen weiteren Einfluss auf den Versuchsausgang. Verformt sich zusätzlich die Tragkonstruktion, so wird weniger Energie auf die Glastafel übertragen. Geringere Spannungen im Glas und geringere Beschleunigungen des Stoßkörpers (Pendel oder Mensch) sind die Folge. Bei einer rechnerischen Dimensionierung einer absturzhemmenden Fassadenkonstruktion kann der zusätzlich von der Tragkonstruktion aufgenommene Energieanteil mit berücksichtigt werden.

Tabelle 3.7: Eingangswerte Beispiel 2

Prüfkörper (Glastafel)	
Generalisierte Masse der Glastafel [kg]	50
Ersatzsteifigkeit der Glastafel [N/m]	395.761
Stoßkörper (DIN EN 12600)	
Masse des Stoßkörpers [kg]	50
Ersatzsteifigkeit des Stoßkörpers [N/m]	197.881
Fallhöhe [m]	0,45

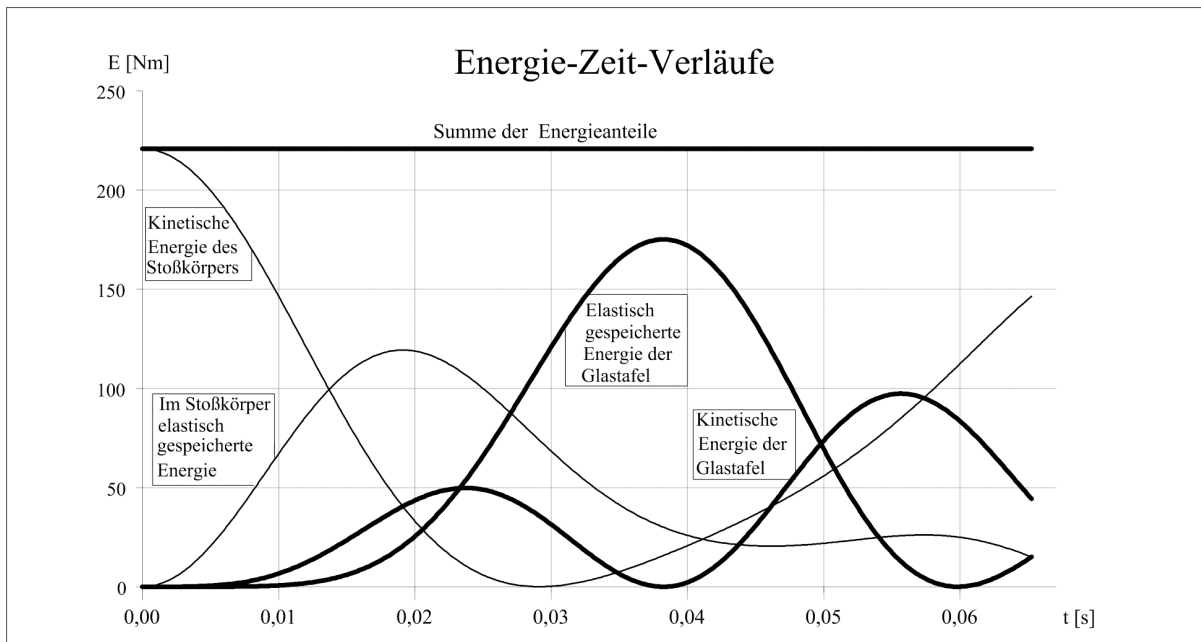


Bild 3.11: Energieverteilung berechnet mit dem Zweimassenschwingermodell, $2 \cdot c_{pk} = c_{sk}$, $m_{pk} = m_{sk}$

3.4.3.5 Energieübertragung beim Stoßkörper nach DIN EN 12600

Veranlasst von der Glasindustrie und von der Normungskommission CEN/TC129/WG13 „Glas im Bauwesen“, die mit der Erarbeitung der DIN EN 12600 betraut war, wurde 1993 als Stoßkörper ein luftgefüllter Reifen vorgeschrieben. In [Sc 93] Abschnitt 5.3 und Anhang C ist die beim Pendelschlag auf die Glastafeln zu übertragende Energie angegeben. Geprüft wurden unterschiedlich dicke rechteckige Glastafeln mit den Abmessungen 875 mm x 1938 mm ($b \times h_G$). In Tabelle 3.8 sind die Messwerte den Berechnungsergebnissen mit dem Zweimassenschwingermodell gegenübergestellt. Die ermittelten Energieübertragungsraten beziehen sich auf die potentielle Energie des Stoßkörpers vor dem Auslösen.

Tabelle 3.8: Experimentell und rechnerisch ermittelte Energieübertragungsraten bei 450 mm Fallhöhe

Scheibendicke [mm]	Versuch Energieübertragungs- rate ¹⁹ vom Stoßkörper auf den Prüfkörper E_{elast} [%]	Mit dem Zweimassenschwingermodell berechnete Energieübertragungsraten [%]		
		E_{elast}	E_{kin}	Σ
6	14,6	12,4	21,8	34,1
8	11,2	17,1	16,2	33,4
10	15,7	15,7	10,3	26,0

Aus den im Versuch gemessenen Wegen wurde auf die im Prüfkörper gespeicherten Energien rückgerechnet. Zusätzlich wird die Glastafel beschleunigt und damit ein Teil der Energie als kinetische Energie übertragen. In Tabelle 3.8 sind die Teilenergien für unterschiedlich dicke Glastafeln dargestellt. Mit zunehmender Plattendicke wurde weniger Energie vom Stoßkörper auf den Prüfkörper übertragen. Die größte Änderung ergibt sich bei der kinetischen Energie, da die schwereren und steiferen Tafeln geringer beschleunigt werden. Die Masse und die Steifigkeit des Stoßkörpers wurden konstant gehalten.

3.4.3.6 Grenzen des linearen Zweimassenschwingermodells

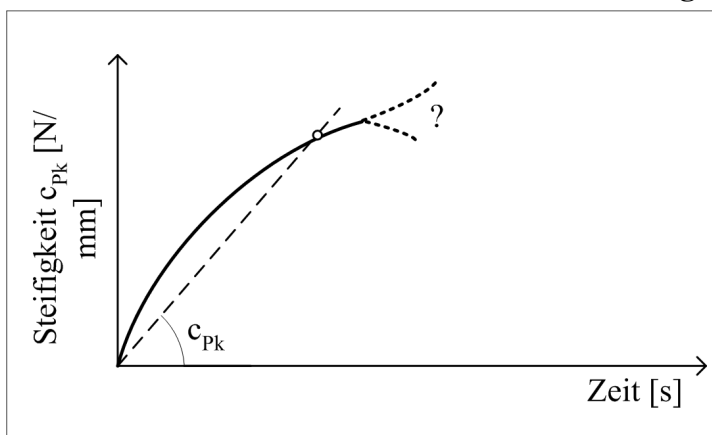


Bild 3.12: Näherungsweise Bestimmung der Prüfkörpersteifigkeit

Das lineare Zweimassenschwingermodell bildet nur den zentrischen Stoß, bei dem die Stoßnormale durch die Schwerpunkte der Stoßpartner verläuft, ab. Die Massen- und die Steifigkeitsverhältnisse bleiben während des Stoßes konstant. Auf diese Art kann der versteifende Membraneffekt in der Glasplatte nicht abgebildet werden. Dieser ändert die Steifigkeit c_{Pk} des Prüfkörpers während des Stoßes (Bild

3.12). Neben der Steifigkeitsänderung hat die, infolge des ungleichförmigen Schwingungsverhaltens, sich ändernde in eine Richtung wirkende Masse ebenfalls einen großen Einfluss auf den Schwingungsverlauf und damit die Beanspruchungen beider Stoßpartner. Besonders bei baupraktischen Verhältnissen, mit großen dünnen und damit unter Anprall stark schwingende Glastafeln, wird der Anprall eines Stoßkörpers auf eine Glastafel mit dem Zweimassenschwingermodell nicht ausreichend genau simuliert. Für eine sichere und wirtschaftliche Dimensionierung sollte dieses Verfahren nicht angewendet werden.

¹⁹ Die Energieübertragungsrate (im Versuch ermittelt, mit einem Reifen als Stoßkörper) wurde aus den Diagrammen im Anhang C von [Sc 93] abgegriffen.

Nach Meinung des Autors lassen sich mit dem linearen Zweimassenschwingermodell für ausgewählte Fälle die Stoßeffekte rechnerisch beschreiben und wichtige Erkenntnisse ableiten. So wurden die Kräfteverhältnisse, das Verformungsverhalten und die Geschwindigkeitsverläufe abgeschätzt. Diese Daten können zur Kontrolle von FE – Simulationen dienen. Als Beispiel wird der Lastfall „Stoß gegen die starre Wand“ erwähnt. Dieser Lastfall wird vom Zweimassenschwingermodell in ausreichender Näherung abgebildet und kann zur Validierung eines FE – Modells verwendet werden. Das von Wörner und Schneider [Wö 00a] erarbeitete und vorgeschlagene Ersatzmodell lässt jedoch keine allgemein zutreffende und wirtschaftliche Dimensionierung von absturzhemmenden Glastafeln zu.

3.5 Finite - Elemente - Modellierung

3.5.1 Referenzlösungen: Schritte zum geeigneten Modell

FE – Modelle, die den Stoßvorgang realitätsnah abbilden sollen, müssen zunächst die Geometrie der Stoßpartner, einschließlich der Lagerung, wirklichkeitsnah abbilden. Dies gilt allgemein aber im Besonderen für FE – Modelle mit deutlich unterschiedlichen Steifigkeiten an Lagern oder an Kontaktstellen bei verschiedenen Werkstoffen. Ferner sind Elemente und Lösungsalgorithmen zu verwenden, die das transiente und nichtlineare Schwingungsverhalten der Platte sowie das Kontaktproblem prinzipiell zutreffend beschreiben können. Jedes FE – Modell beinhaltet notgedrungen zahlreiche Vereinfachungen. Aufgrund der möglichen Bandbreite der Modellierungsmöglichkeiten und der Wahl der Eingabeparameter ist es erforderlich, das Modell zur Simulation an Messdaten zu validieren. Wird im Abgleich keine befriedigende Übereinstimmung erzielt, ist es durch Modifikation weiter zu verbessern. Dies erfolgt in mehreren Schritten:

- Mit der Verifikation wird sichergestellt, dass ein Berechnungswerkzeug ein physikalisches Problem lösen kann, d. h. das numerische Modell führt zur gleichen, wie die von einer vorhandenen analytischen Betrachtung vorgegebenen Lösung. Das theoretische, numerisch umgesetzte Modell wird im Regelfall anhand einer bekannten, analytischen Lösung verifiziert.
- Unter Kalibrierung versteht man die Identifikation und das Anpassen von Vorgaben des Rechenmodells (z. B. Werkstoffparametern, Netzfeinheit, Zeitschritte, Kontaktsteifigkeiten) an Versuchsergebnissen oder am Ergebnis einer analytischen Lösung. Häufig ist es zweckmäßig, vereinfachte Teilmodelle zum Kalibrieren, z. B. einer Werkstoffeigenschaft einer elastischen Glaslagerung, zu verwenden. Die ermittelten Parameter werden anschließend in das zur Problembeschreibung gedachte FE – Modell übernommen.
- Stimmen die Berechnungsergebnisse des gewählten FE – Modells nach der Verifikation und Kalibrierung mit den vorhandenen Versuchsergebnissen bzw. der Wirklichkeit in befriedigendem Maße überein, kann es als geeignet angesehen werden. Diese abschließende Kontrolle, auch **Validierung** (value, engl. Wert) genannt, liefert die Bestätigung der Anwendbarkeit und Eignung des FE – Modells. Weichen die Ergebnisse des Gesamtmodells deut-

lich von den Vergleichsdaten (Benchmark) ab, muss das Modell verbessert und der beschriebene Vorgang wiederholt werden. Zur Eichung können verschiedene Messdaten wie Beschleunigungen, Verformungen, Kräfte etc. verwendet werden.

- Ist ein Modell validiert, können - ausgehend von dieser Modellierungs- und Parameterwahl – auch abweichende Geometrien zur statischen und dynamischen Bemessung bei Bauvorhaben berechnet werden. Dieses Vorgehen ist kein „Beweis“, dass das Modell die richtige Lösung ermittelt. Es ist aber ein Hilfsmittel, mit dem die Qualität von FE – Modellen verbessert und Fehler reduziert werden. Bei FE – Anwendungen in anderen Ingenieurgebieten wie z. B. im Automobilbau bei der Simulation von Crashtests oder Tiefziehprozessen, werden nur die Ergebnisse von validierten FE – Modellen als ernsthafte Lösung angesehen. Außerdem sind diese Modelle geeignet, verschiedene Einflüsse in Parameterstudien zu studieren. Ändert sich dabei keine wesentliche Randbedingung z. B. Linienlager anstelle von Punktlagern, wird die Wirklichkeit mit guter Näherung simuliert. Nur entsprechend aufgebaute und validierte FE – Modelle können ein mechanisches Problem realistisch beschreiben.

3.5.2 Referenzlösungen zur Validierung des Stoßkörpermodells nach DIN EN 12600

Zur Validierung des Stoßkörpers muss zuerst dessen Steifigkeit überprüft werden. Das Modell muss in der Lage sein, das tatsächliche Verhalten nachzubilden. Zur Validierung dienen die Versuchsergebnisse von Pendelschlägen auf die starre Wand. Die Kräfte, die beim Schlag auf den Stoßkörper wirken, sind in Tabelle 3.9 dargestellt. Die gemessenen Beschleunigungen sind [Sc 01] Abschnitt 12.1 entnommen. Hieraus wurde die Stoßkörperkraft ermittelt. Die Werte in Klammern sind Simulationsergebnisse mit SJ MEPLA.

Tabelle 3.9: Stoßkörperkräfte bei Stößen gegen die starre Wand

Fallhöhe h [mm]	Versuchsergebnisse von Wörner und Schneider [Sc 01]		Rechercheergebnisse SJ MEPLA ²⁰		Abweichung gemessene bezogen auf berechnete Beschleunigung [%]
	maximale Stoßkörperbeschleunigung [m/s ²]	Rückgerechnete Stoßkörperkraft [kN]	Pendelbeschleunigung [m/s ²]	Stoßkörperkraft [kN]	
450	279 ²¹	13,9	264	13,2	5,4
495	-	-	279	13,9	-
700	342 ²¹	17,1	339	17,0	0,9
710	-	-	342	17,1	-

²⁰ Stoßkörper als Massenpunkt und nichtlineare Feder, siehe Bild 3.22 und Bild 3.23

²¹ Messwert aus [Sc 01]

Ein Zeit-Beschleunigungs-Verlauf kann ebenfalls zur Validierung dienen. Die tatsächlich enthaltene Energie wird über den Kraftstoß nach Gleichung (3.16) aufintegriert. Zur einfacheren Handhabung lassen sich die in Bild 3.13 und Bild 3.14 dargestellten Verläufe mit den gegebenen Gleichungen annähern. Die Auftreffgeschwindigkeit des Stoßkörpers wird mit der Formel (3.16) aus dem Integral des Kraftstoßes $F(t)$ beim elastischen Stoß gegen die starre Wand über die Beschleunigungskurve $a_{sk}(t)$ zurückgerechnet.

$$I = \int_0^{t_p} F(t) \cdot dt \quad (3.16)$$

Dabei wird das Integral nur für die erste Hälfte des Stoßes ausgewertet. Für die zur Validierung des Stoßkörpermodells durchgeführten Berechnungen können die aus dem Impulsverlauf der Versuchsdaten rückgerechneten Ausgangslagen (Fallhöhen) verwendet werden. Die Messdaten in Bild 3.13 und in Bild 3.14 sind [Wö 00a] entnommen. Zur praxistauglichen Anwendung wurden Trendkurven berechnet, mit denen die Verläufe angenähert werden können.

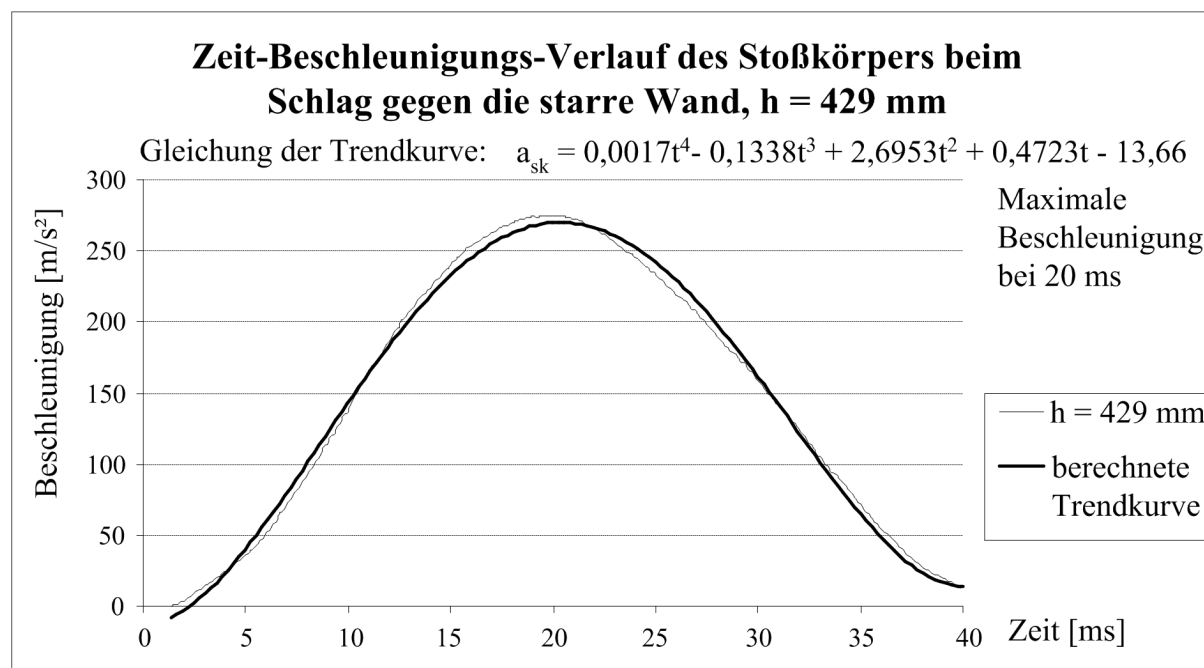


Bild 3.13: Beschleunigung über die Zeit für die Validierung des FE – Modells über die Pendelbeschleunigungen mit 429 mm Fallhöhe

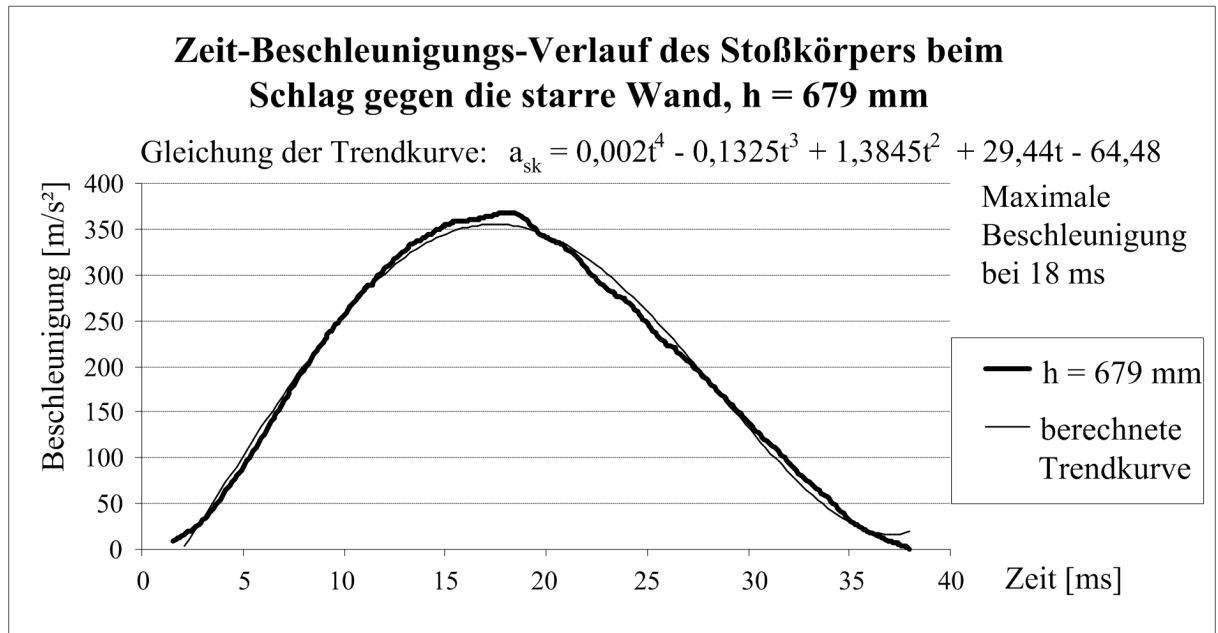


Bild 3.14: Beschleunigung über die Zeit für die Validierung des FE – Modells über die Pendelbeschleunigungen mit 679 mm Fallhöhe

In Bild 3.42 sind die Berechnungsergebnisse eines validierten FE – Modells (LS-DYNA) den Messwerten der Stoßkörperbeschleunigungen aus den Bildern Bild 3.13 und Bild 3.14 gegenübergestellt. Aufgrund der guten Übereinstimmung wird mit der zugrunde liegenden Stoßkörpermodellierung in den folgenden Untersuchungen weitergearbeitet.

3.5.3 Referenzlösungen zur Validierung des Glastafelmodells

Durch Auswertung der Versuchsergebnisse, die Bucak und Lorenz [Bu 04a] bei Pendelschlagversuchen auf Glastafeln aufgezeichnet haben, werden Referenzlösungen zur Validierung der FE – Modellierung der Glastafel erarbeitet. Ziel der Versuche war es, das Verformungsverhalten der Glastafel ohne Einfluss einer möglichen Teileinspannung in den Linienlagern zu bestimmen. Die rechteckige Glastafel mit den Abmessungen 360 mm x 1.100 mm x 8 mm wurde an den Schmalseiten zweiseitig ideal gelenkig gelagert. Der Prüfrahm bestand aus verschweißten U 100 Profilen und dient lediglich als Druckauflager. Der direkte Stahl-Glas-Kontakt wurde mit einem auf den Rahmen aufgeklebten Paketband als Trennschicht ausgeschlossen. Das Eigengewicht der Glastafel wurde über zwei Seilschlaufen abgetragen (Bild 3.15). Diese beeinträchtigten das Durchbiegungs- und Verformungsverhalten der Glastafel nicht. Als Fallhöhe des Stoßkörpers gemäß DIN EN 12600 wurde in diesem Versuch 100 mm gewählt. Der Auftreffort war die Tafelmitte. Der Messpunkt der Verformungen wurde bei einem Drittel der Glastafellänge auf halber Plattenhöhe gewählt. Am Prüfrahm sind während des Stoßes keine Verschiebungen aufgetreten. Deshalb kann der Prüfrahm (Lager) im FE – Modell als ideal starr idealisiert werden. Der gemessene Weg – Zeit – Verlauf ermöglicht eine Beurteilung des Schwingverhaltens der Glastafel. FE – Modellierungen können daran verifiziert werden. Gemessen wurden vier Stoßereignisse. Vor jedem Anprall war der Stoßkörper über eine dünne Schnur mit der Kranflasche des Hallenkrans verbunden

und wurde so auf die gewählte Fallhöhe hochgezogen. Der Stoß wurde ausgelöst, indem die Halteschnur mit einem Seitenschneider durchtrennt wurde.



Bild 3.15: Bild des Versuchsaufbaus, Geometrie entsprechend Bild 3.16 Foto: Labor für Stahl- und Leichtmetallbau FHM

Ein repräsentativer Verlauf der Verformungs – Zeit – Funktion wird für diese Arbeit ausgewählt und mit einer Polynomfunktion angenähert (Bild 3.17). Damit kann die Eignung der verwendeten finiten Elemente überprüft werden. Elemente, die nur ein geometrisch lineares Verformungsverhalten abbilden, werden die Versuchsergebnisse nicht simulieren können. FE – Berechnungen ohne Ansatz einer Werkstoffdämpfung zeigen über dem repräsentativen Weg – Zeit – Verlauf Oberschwingungen (Bild 3.21). Wird mit einer Werkstoffdämpfung gearbeitet, verlängert sich die gesamte Stoßphase. Für Bemessungsaufgaben an Bauvorhaben ist es nicht erforderlich, die Werkstoffdämpfung zu berücksichtigen. Die für das ungedämpfte Modell berechneten Biegezugspannungen in der Glastafel liegen teilweise sogar höher als bei der gedämpften Variante. Bei größeren Fallhöhen wurden die Oberschwingungen der Glastafel auch in den Verformungsmessungen registriert. Hinweise zu den bei diesen Versuchen vorhandenen Werkstoffkenngrößen sind in Abschnitt 3.9.1 dieser Arbeit enthalten.

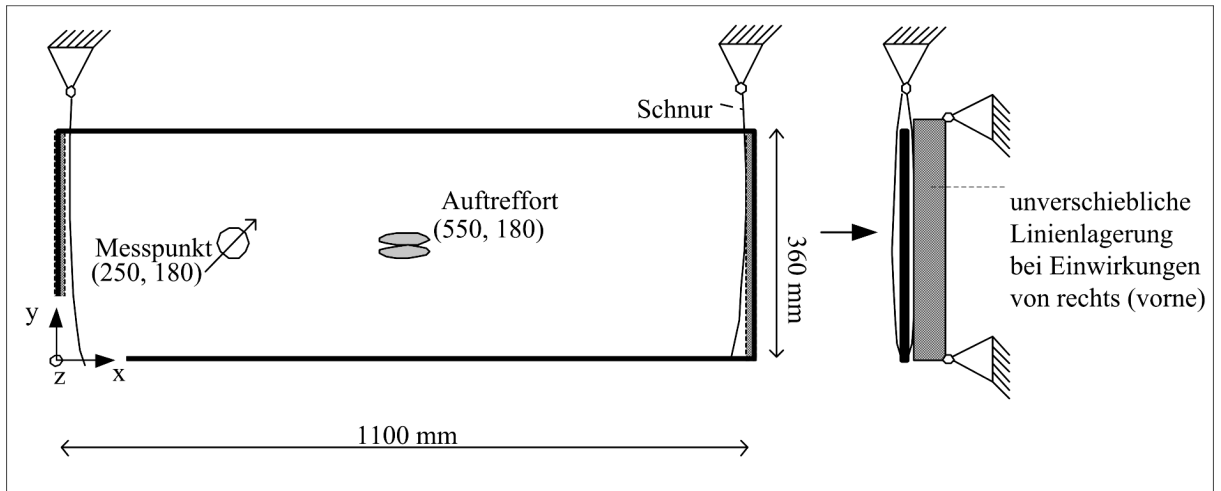


Bild 3.16: Referenztabelle zur Kontrolle der Elemente

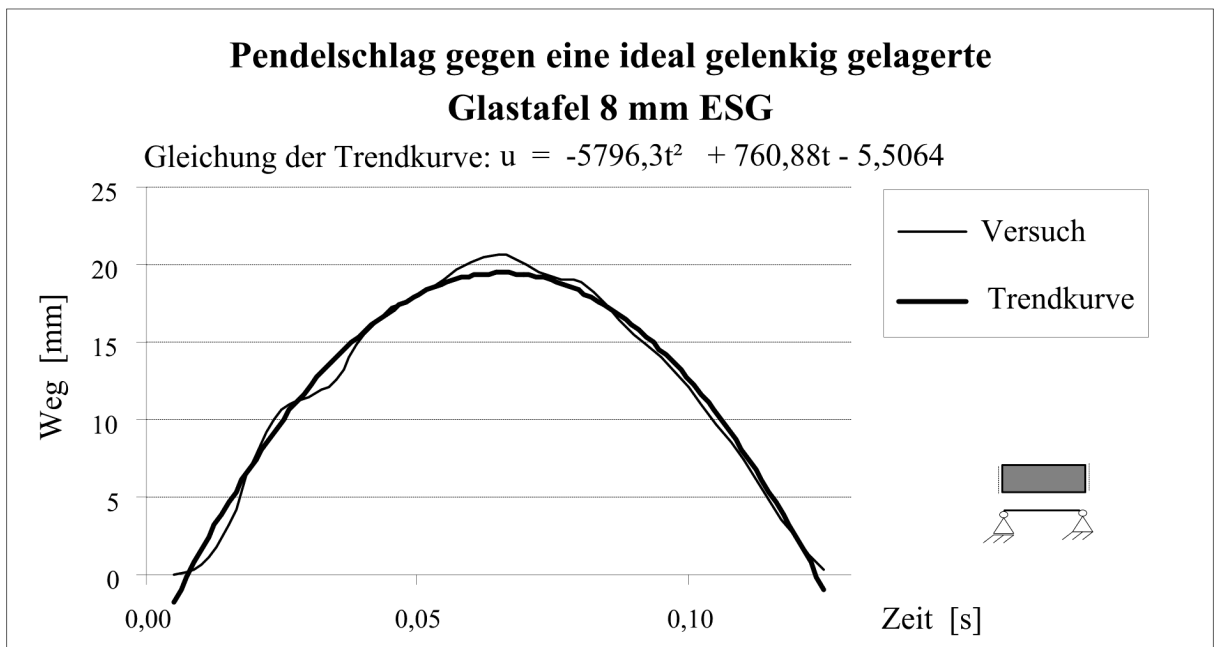


Bild 3.17: Messergebnisse an der ideal gelenkig gelagerten Referenztabelle, $h = 100 \text{ mm}$

3.5.4 Einfluss der Linienlagerung

Am Bauwerk ausgeführte Typen von Linienlagerungen bewirken in der Regel eine Teileinspannung der Glastafel. Die daraus resultierenden Drehfedersteifigkeiten beeinflussen das Verformungsverhalten der Glastafel. Zur Überprüfung des Lagereinflusses und des statischen Elastizitätsmoduls wurden in [Bu 04] statische Druckversuche an der unter 3.5.3 beschriebenen Glastafel durchgeführt. Untersucht wurde eine Lagerung mit Neoprene – Zwischenlagen der Shore Härte A 60.

Der Glaseinstand zwischen den 4 mm dicken Neoprene – Schichten betrug 10 mm. Die Pressleisten aus Stahl mit den Abmessungen 3 mm x 50 mm x 360 mm wurden über drei Schrauben M 8 mit 150 mm Abstand mit jeweils 10 Nm Anzugsdrehmoment gegen den Prüfraahmen

geschraubt. Die Verformungen wurden in der Glastafelmitte, auf der dem Druckzylinder gegenüberliegenden Seite, gemessen. Der Versuchsaufbau ist in Bild 3.19 dargestellt.

Sollen Versuche wirklichkeitsnah simuliert werden, kann der Elastizitätsmodul der Zwischenlage mit der Näherungsformel nach Battermann [Ba 82] abgeschätzt werden. Bei einem Linienlager mit Rechteckquerschnitt ergibt sich der Formfaktor q (3.17). Mit dem Gleitmodul aus Gleichung (3.18) lässt sich daraus mit (3.19) der Elastizitätsmodul (Druckmodul) des Lagers berechnen:

$$q = \frac{b_L \cdot l_L}{2 \cdot h_L \cdot (b_L + l_L)} \quad (3.17)$$

$$Gl = 0,086 \cdot 1,045^{sh} \quad (3.18)$$

$$E_D = 3 \cdot Gl \cdot (1 + q + q^2) \quad (3.19)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
b_L	Breite des Linienlagers	[mm]
Gl	Gleitmodul der elastischen Zwischenlage im Linienlager	[N/mm ²]
h_L	Höhe des Linienlagers	[mm]
L	Spannweite	[mm]
l_L	Länge des Linienlagers	[mm]
Q	Formfaktor des elastischen Linienlagers	[-]
Sh	Shore Härte	[-]

Für die untersuchte Lagerart kann der Druckmodul der Lager für die gegebene Geometrie mit 13,4 N/mm² abgeschätzt werden. Die Ergebnisse von geometrisch nichtlinearen Vergleichsberechnungen mit dem Programm SJ MEPLA sind in Bild 3.20 dargestellt. Der Elastizitätsmodul der Glastafel wurde mit 70.000 N/mm² angesetzt. In der Berechnung „SJ MEPLA elast“ wurde jede Seite des Linienlagers als zwei unmittelbar aneinandergrenzende Streifen mit jeweils halber Lagerbreite idealisiert (Bild 3.18). Im Programm werden die Lagersteifigkeiten als zwei Federreihen abgebildet.

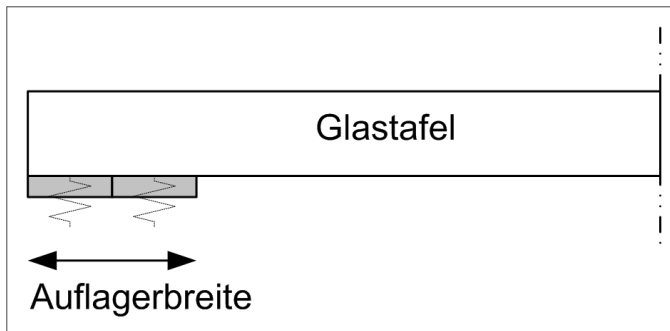


Bild 3.18: Idealisierung der Teileinspannung im FE – Modell mit SJ MEPLA

Mit diesem Ersatzmodell kann eine Drehlagerung mit Teileinspannung simuliert werden. Dieses Berechnungsmodell wird durch die Versuchsergebnisse bestätigt (Bild 3.20). Mit dem Modell bei Ansatz gelenkiger Linienlager „SJ MEPLA gel“ wurden gegenüber dem Versuch geringfügig größere Verformungen berechnet.

Der Vergleich der Berechnungs- mit den Versuchsergebnissen bestätigt die gewählten Werkstoffparameter des Glases und der Linienlager.

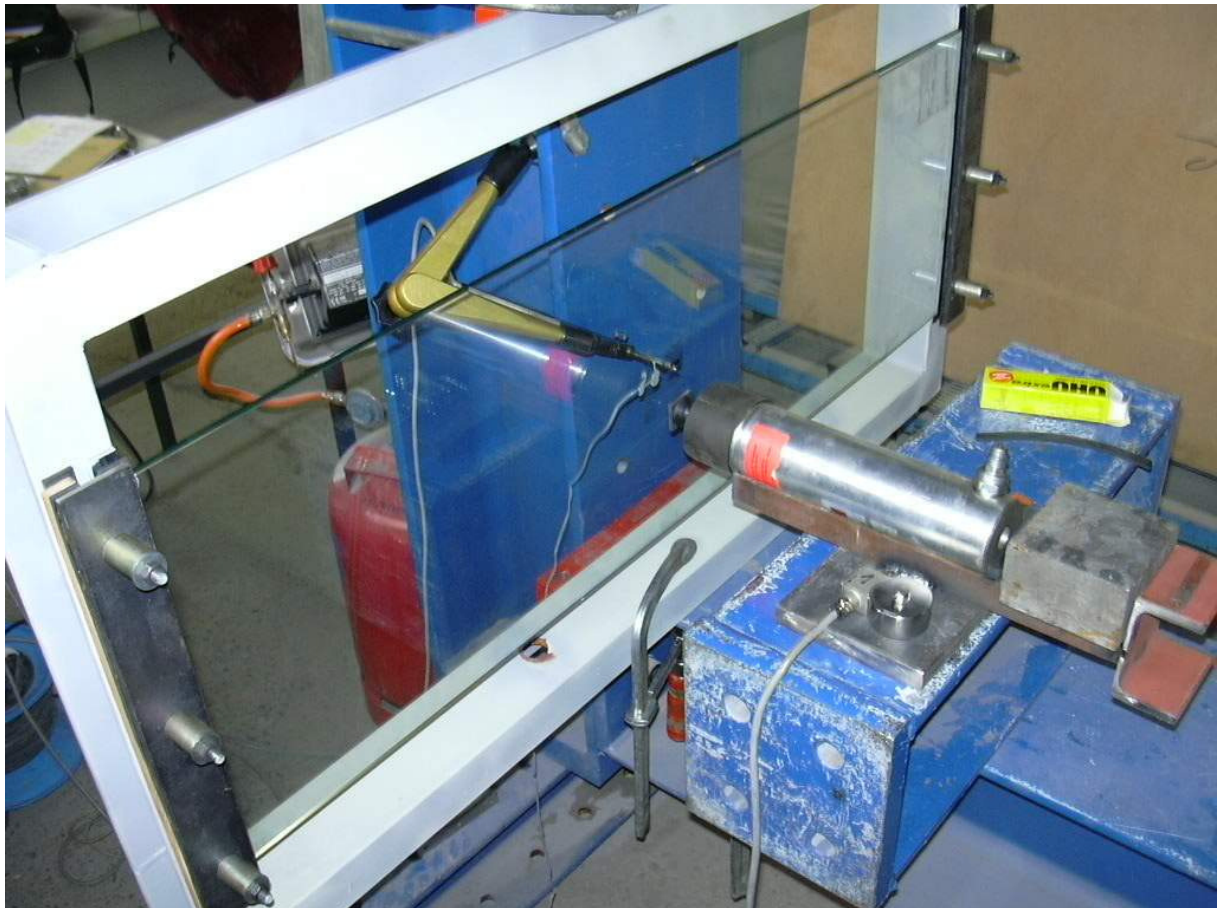


Bild 3.19: Versuchsaufbau statischer Druckversuch

Foto: Labor für Stahl- und Leichtmetallbau FHM

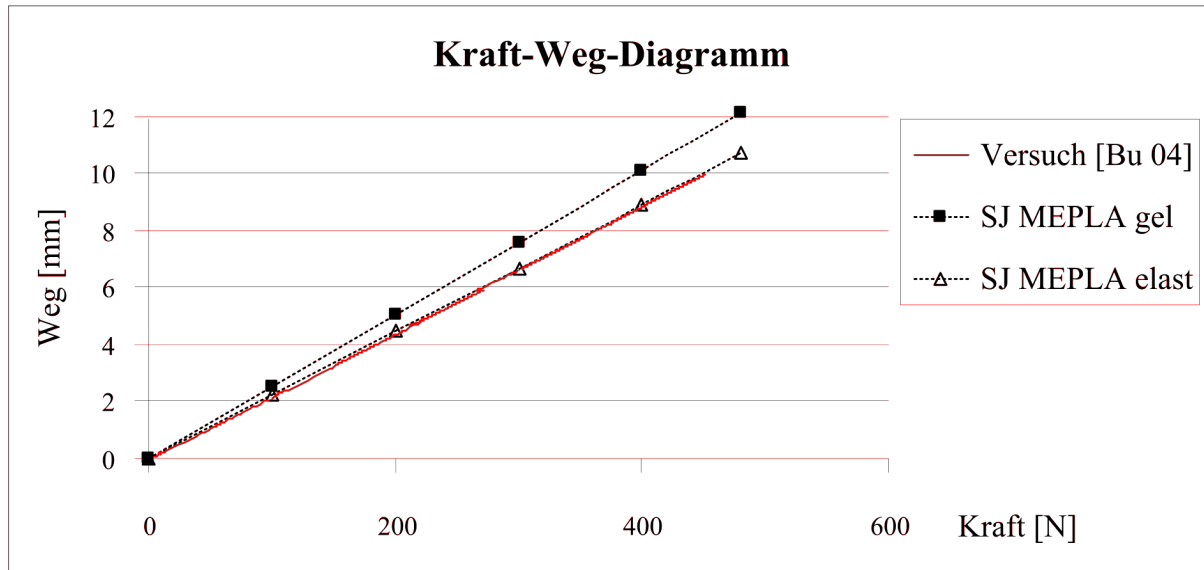


Bild 3.20: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messwerten des statischen Druckversuchs

Die Validierung von FE – Berechnungen zur Simulation von Pendelschlagversuchen kann anhand der in Bild 3.21 dargestellten Messdaten erfolgen. Zur Vereinfachung der Validierung von FE – Modellen wurden zusätzlich Trendkurven mit einem polygonalen Ansatz berechnet. Der angenäherte Funktionsverlauf kann so direkt den Berechnungsergebnissen gegenübergestellt werden.

Auf die Glastafel mit der beschriebenen Lagerung wurden Pendelschläge mit einer Fallhöhe von 180 mm ausgeführt. Der Kraft-Weg-Verlauf wurde am Messpunkt (Bild 3.16) aufgezeichnet. Wird der Anprall des Stoßkörpers mit SJ MEPLA mit Materialeigenschaften wie in den Modellen zur Simulation der statischen Druckversuche simuliert, ergibt sich rechnerisch die maximale Plattendurchbiegung mit 39,4 mm. Diese Abweichung gegenüber den Messergebnissen aus Bild 3.21 erfordert weitere Überlegungen. Zunächst wurden für diese Arbeit Vergleichsberechnungen mit nichtlinearen Werkstoffgesetzen der Lager durchgeführt [Br 04]. Die Ergebnisse dieser aufwändigen Berechnungen konnten nicht zur Klärung der Abweichungen beitragen. Erst mit der hier vorgenommenen systematischen Auswertung der in [Bu 04a] beschriebenen Pendelschlagversuche ohne Lagereinfluss, konnte die Abweichung infolge der sich ändernden Steifigkeitseigenschaften des Prüfkörpers erklärt werden.

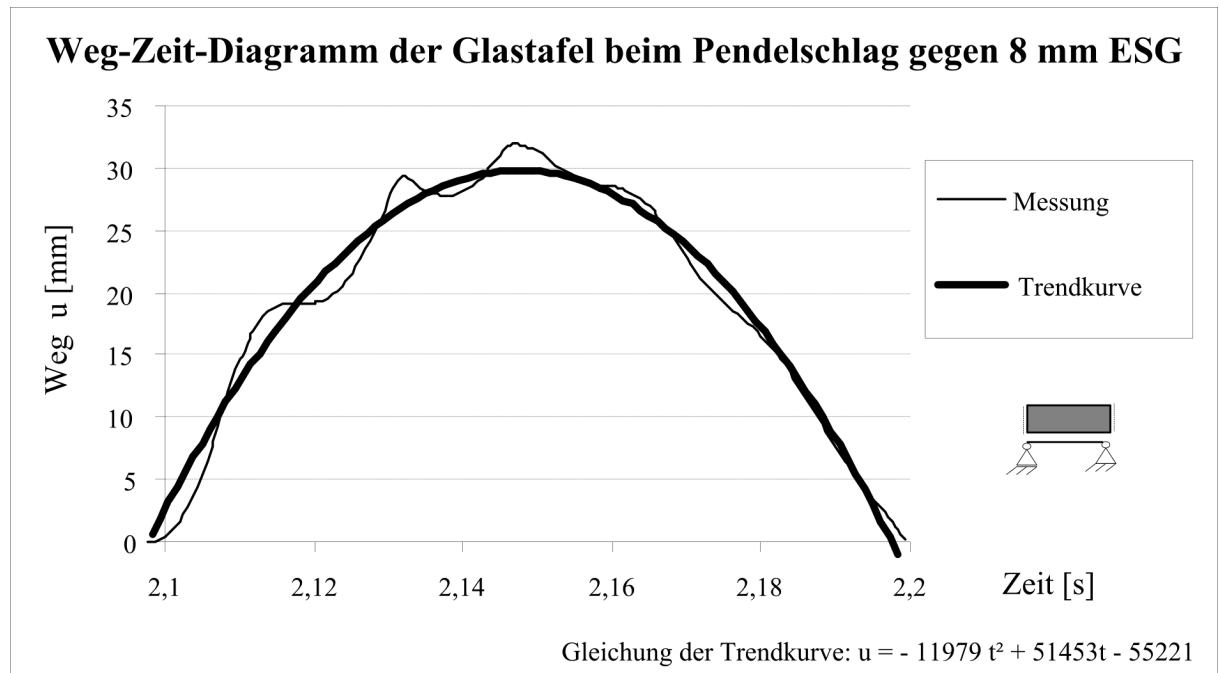


Bild 3.21: Validierung einer Glastafel mit Linienlagerung Fallhöhe 180 mm

Der Werkstoff Glas ändert seine Steifigkeitseigenschaften unter Stoßeinwirkung bzw. bei hoher Belastungsgeschwindigkeit. Die Größenordnung des dynamischen Elastizitätsmoduls für Einscheiben-Sicherheitsglas ist in Kapitel 3.9.1 hergeleitet.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das Verformungsverhalten maßgeblich vom dynamischen Elastizitätsmodul beeinflusst wird. Die in diesem Kapitel untersuchte Teileinspannung infolge der elastischen Linienlager ist vergleichsweise gering und kann in der Baupraxis vernachlässigt werden. Im konstruktiven Glasbau übliche Pressleistensysteme können ausreichend genau als eine gelenkige Lagerung idealisiert werden. Sind Nachgiebigkeiten der Unterkonstruktion zu erwarten, die Werte in der Größenordnung der Grenzwerte der TRLV erreichen, sind diese zu berücksichtigen.

3.5.5 Referenzlösungen zur Validierung von MSI-Modellen

Für die Validierung stehen Daten aus verschiedenen Versuchsreihen zur Verfügung. Rück [Rü 01] hat mehrere allseitig gelagerte rechteckige Glastafeln aus Einscheiben-Sicherheitsglas und Mehrscheiben-Isolierverglasungen mit den Abmessungen von 1.050 mm x 2.056 mm in Bauteilversuchen untersucht. Die Ergebnisse der Versuche an diesen Glastafeln wurden für VSG (Bild 3.53) und für MSI (Bild 3.64) zu Vergleichszwecken herangezogen. Über die dargestellten Trendlinien werden die Weg - Zeit - Verläufe mathematisch beschrieben und können den Rechenergebnissen gegenübergestellt werden.

Mehrscheiben-Isolierverglasungen sind in der vorliegenden Arbeit nicht der Schwerpunkt und werden nur der Vollständigkeit wegen in wenigen Beispielen angesprochen. Zum Validieren von FE - Simulationen von Mehrscheibenisolierverglasungen eignen sich zusätzlich die Messdaten von [Rü 01], Beilage 1 bis 14 oder die Veröffentlichung [Br 04a] bzw. [Br 04b].

3.6 Simulation des Stoßvorganges mit SJ MEPLA

3.6.1 Allgemeines

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auch das Programm SJ MEPLA zur Simulation des Pendelschlagversuchs nach DIN EN 12600 verwendet. Hiermit kann das nichtlineare Schwingungsverhalten der Platte simuliert werden, das einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse beim Lastfall „Stoßkörperanprall“ hat. Die Tragfähigkeit von monolithischen Glastafeln und Mehrscheiben-Isolierglastafeln mit beliebigem Aufbau und beliebigen Lagerungsbedingungen lassen sich unter stoßartiger Einwirkung mit dem Programmsystem zutreffend berechnen. Die verwendeten Elementformulierungen können das nichtlineare Steifigkeitsverhalten der Platte beschreiben. Der Stoßkörper wird als Massenpunkt angenommen, das Steifigkeitsverhalten der Gummireifen wird als nichtlineare Feder abgebildet. Die Abbildung davon abweichender Stoßkörpereigenschaften ist nicht vorgesehen. Der prinzipielle Ablauf der Simulation kann anhand von zwei gedachten Teilsystemen, die jeweils das Kräftegleichgewicht erfüllen, erläutert werden. Im Teilsystem des beschleunigten Massenpunktes und der Feder, welche die Reifen simuliert, herrscht Kräftegleichgewicht (siehe Bild 3.22). Im zweiten Teilsystem, bestehend aus der Feder und der Glastafel, wird ebenfalls das Kräftegleichgewicht erfüllt, wobei zusätzlich noch die Steifigkeit der Unterkonstruktion abgebildet werden kann. Dieser Zustand lässt sich mit Bewegungsgleichungen beschreiben, die das Finite Elemente Programm löst. Aus den berechneten Verformungen können die Schnittgrößen ermittelt werden. Die theoretischen Grundlagen zu den verwendeten voll integrierten neunknotigen Mehrschicht-Elementen des Programms sind von Bohmann in [Bo 99] und [SJ 01] ausführlich beschrieben. Die nachfolgend vorgestellten Simulationen der Pendelschlagversuche wurden mit SJ MEPLA, Version 2.5.0 durchgeführt.

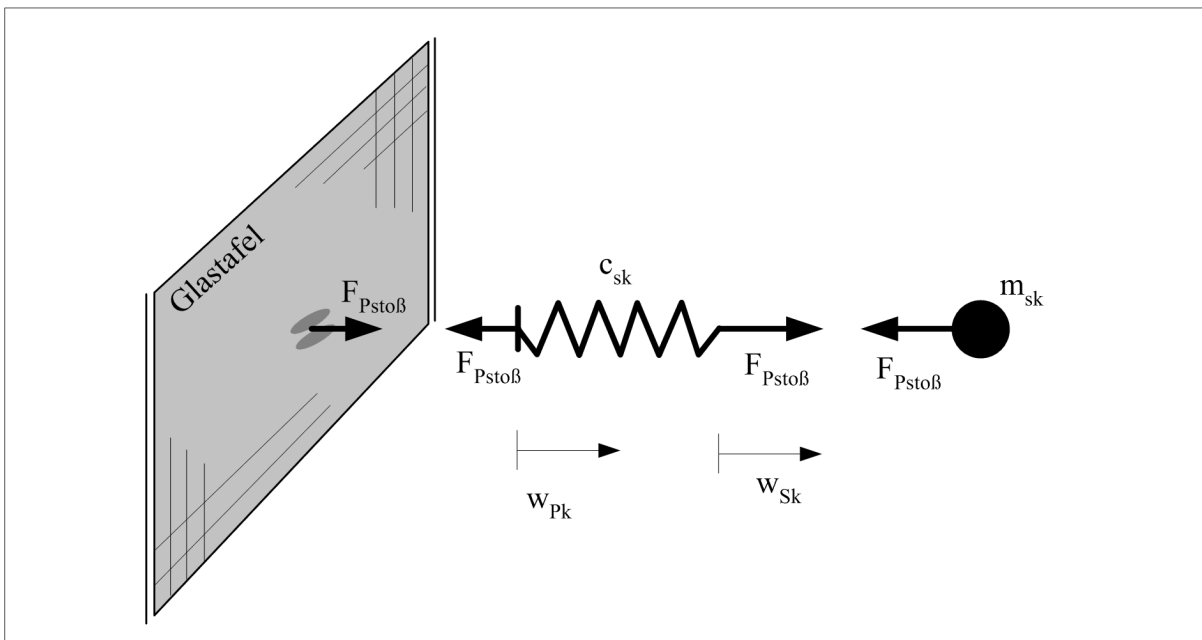


Bild 3.22: Statisches System in SJ MEPLA

3.6.2 Validierung des FE – Modells

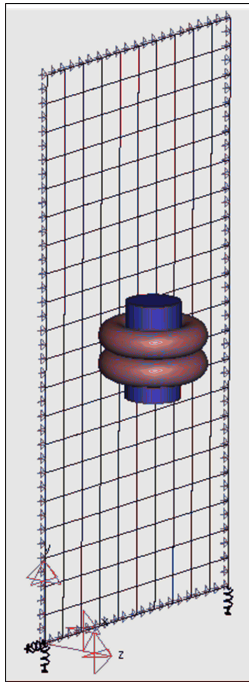


Bild 3.23: FE-Modell des Programms SJ MEPLA

Im Handbuch [SJ 01] sind Versuchsergebnisse von Pendelschlägen gegen verschiedene Glastafeln dargestellt, die mit dem Programm in guter Näherung beschrieben werden. Damit ist die prinzipielle Eignung des Fei-Programms zur Simulation des Pendelschlagversuches bestätigt. Buhmann hat den in Kapitel 3.5 beschriebenen Weg zur Validierung der Eigenschaften der nichtlinearen Ersatzfedersteifigkeit des Stoßkörpers c_{sk} beschritten. Das integrierte Massenpunkt-Federmodell wurde anhand der Daten aus Beschleunigungsmessungen am Stoßkörper, der mit verschiedenen Fallhöhen gegen eine starre Stahlwand prallte, kalibriert.

Schneider [Sc 01] hat zahlreiche Simulationsergebnisse von Untersuchungen mit unterschiedlicher Geometrie und verschiedenen Glasaufbauten dargestellt, die in guter Näherung mit Versuchsergebnissen übereinstimmen. In [Br 01] wurden ebenfalls Simulationsergebnisse des Pendelschlages mit SJ MEPLA an zahlreichen Glastafelgeometrien mit Bauteilversuchen verglichen. Die Simulationsergebnisse bilden das Stoßereignis nach. Beachtet man die Streuung von Versuchen (Abschnitt 2.4.5), bestätigen die Bauteilversuche die in Kapitel 3.6.3 zusammengestellten Simulationsergebnisse. Mit dieser Validierung sind der Simulationsvorgang und das Steifigkeitsverhalten des Stoßkörpers in SJ MEPLA anhand von Versuchen bestätigt. Vergleiche von Simulationen mit Versuchsergebnissen (Anhang A 7 oder die rechnerischen Vorhersagen der Versuchsergebnisse ([Br 04d], [Br 04e]) belegen, dass ein verifiziertes FE – Modell den Versuch wirklichkeitsnah abbilden kann und schlüssige Aussagen über die Eignung einer absturzhemmenden Glastafel erlauben.

Zur Dimensionierung einer absturzhemmenden Glastafel müssen die im Werkstoff Glas berechneten Spannungen kleiner als die charakteristische Biegezugfestigkeit sein. D.h. das Glas wird nur bis zum Bruch ausgenutzt. Im Bauteilversuch können auch gebrochene Glastafeln noch als absturzsichernd bewertet werden. In diesen Fällen muss das gebrochene Glaselement ein ausreichendes Resttragverhalten aufweisen. Diese Eigenschaft des Resttragverhaltens ist zurückzuführen auf die Tragwirkung der einzelnen Glasbruchstücke, die über die PVB-Folie verbunden sind. Deshalb wird eine Absturzsicherung, deren Eignung rechnerisch durch Simulation des Pendelschlages nach DIN EN 12600 nachgewiesen wird, bisher immer einen unwirtschaftlicheren (dickeren) Glasaufbau aufweisen. Das FE – Modell ist in Bild 3.23 dargestellt.

3.6.3 Ergebnisse mit dem validierten FE – Modell

In der Arbeit von Breckner [Br 01] Abschnitt 9.3, finden sich für verschiedene Pendelschlagversuche Hinweise zu den Abweichungen zwischen den mit SJ MEPLA erhaltenen Simulati-

onsergebnissen und den in experimentellen Untersuchungen gemessenen Dehnungen und Verformungen.

Für diese Arbeit werden die Ergebnisse der Pendelschläge auf raumhohe Verglasungen in Scheibenmitte aus [Br 01] Abschnitt 9.3 bezüglich der Spannungs- und Durchbiegungsabweichungen ausgewertet. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in den Tabelle 3.10 bis Tabelle 3.14 dargestellt. Den Berechnungen liegen die in Tabelle 3 zusammengefassten Annahmen zugrunde. Dargestellt werden der Mittelwert und die Standardabweichung der Differenzen zwischen den Berechnungsergebnissen bezogen auf die gemessenen Versuchswerte.

Insgesamt wurden 28 Simulationen mit Versuchen verglichen. In fünf Fällen wurden in der Simulation kleinere Spannungen berechnet als im Bauteilversuchen gemessenen (Tabelle 3.12 und Tabelle 3.13).

Tabelle 3.10: Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 1,0 m x 2,0 m – 2 x 4 SPG

Glastafel: 1,0 m x 2,0 m – 2 x 4 SPG, Probenumfang n = 5			
Spannungsdifferenz [%]		Verformungsdifferenz [%]	
Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
5,90	4,90	20,76	12,70

Tabelle 3.11: Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 1,0 m x 2,0 m – 2 x 8 SPG

Glastafel: 1,0 m x 2,0 m – 2 x 8 SPG, Probenumfang n = 10			
Spannungsdifferenz [%]		Verformungsdifferenz [%]	
Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
10,50	6,94	27,15	20,35

In 23 Fällen wurde in der Simulation eine höhere Spannung berechnet, als im Bauteilversuch ermittelt wurde (Tabelle 3.16, Tabelle 3.17 und Tabelle 3.20). Die maximale Unterschätzung der Hauptbiegezugspannungen beträgt 7,60 %.

Tabelle 3.12: Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 1,0 m x 2,0 m – 2 x 8 SPG

Glastafel: 1,0 m x 2,0 m – 2 x 8 SPG, Probenumfang n = 3			
Spannungsdifferenz [%]		Verformungsdifferenz [%]	
Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
- 2,90	- 1,01	3,53	1,29

Tabelle 3.13: Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 2,0 m x 3,0 m – 2 x 8 SPG

Glastafel: 2,0 m x 3,0 m – 2 x 8 SPG, Probenumfang n = 2			
Spannungsdifferenz [%]		Verformungsdifferenz [%]	

Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
- 6,05	- 2,19	2,70	3,54

Tabelle 3.14: Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 2,0 m x 3,0 m – 2 x 8 SPG

Glastafel: 2,0 m x 3,0 m – 2 x 8 SPG, Probenumfang n = 8			
Spannungsdifferenz [%]		Verformungsdifferenz [%]	
Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
11,09	1,38	35,21	9,00

Bei allen 28 Pendelschlägen mit Fallhöhen von 50 mm bis 1.100 mm werden im Vergleich zu den Messungen in der Simulationen größere Tafelverformungen berechnet. Die Berechnungen basieren auf den Annahmen eines quasistatischen Elastizitätsmoduls und eines vollen Schubverbunds (siehe Kapitel 3.9.1). Ein validiertes FE – Modell kann Ergebnisse berechnen, die nahe an der Wirklichkeit liegen, aber es garantiert nicht die exakte Lösung. Diese kann selbst mit Bauteilversuchen nicht ermittelt werden, da auch Versuchsergebnisse infolge sich ändernder Randbedingungen (Durchführungsqualität von Versuchen) streuen.

3.6.4 Parameterstudie

Die nachfolgend dargestellten Studien befassen sich mit den einzelnen Parametern, die den Stoßverlauf beeinflussen können. Die Parameterstudie kann auch eine Hilfestellung sein, falls Versuchsergebnisse auf andere Tafelgeometrien übertragen werden sollen. Alle aufgeführten Kriterien sind dabei zu beachten. Zudem werden beobachtete Versuchsergebnisse verständlich:

Bei Versuchen wurde mehrfach beobachtet, dass Pressleisten mit Klipssystemen auch entgegen der Stoßrichtung versagten. Ertüchtigen lassen sich diese Konstruktionen durch das Eindrehen zusätzlicher Schrauben an den Enden der Pressleisten. Die Studie zur Verteilung der Auflagerkräfte in Kapitel 3.6.6 veranschaulicht, dass in den Ecken aufgrund der Drillmomente in der Glasplatte auch Auflagerkräfte entgegen der Stoßrichtung entstehen (siehe Bild 3.39).

Die Parameterstudien wurden unter Ansatz einer einheitlichen Fallhöhe des Stoßkörpers von 450 mm durchgeführt. Untersucht wurden allseitig liniengelagerte rechteckige Glastafeln mit variierenden Abmessungen und Glasaufbauten. Die folgenden Einflussparameter wurden betrachtet:

- Konvergenzstudien zur Netzfeinheit
- Einfluss des Elastizitätsmoduls
- Einfluss der Tafelaufbauten
- Einfluss der Tafelbreite
- Einfluss der wirksamen Masse

- Einfluss des Auftreffortes des Stoßkörpers
- Einfluss der Unterkonstruktion
- Einfluss der Lagersituation

Die prinzipiellen Einflussfaktoren und Effekte beim Stoßvorgang werden bezüglich der Krafteinwirkung auf den anprallenden Stoßkörper (Menschen) dargestellt. Es werden zum besseren Verständnis auch monolithische Glasaufbauten verwendet, die aus baurechtlicher Sicht bisher keine absturzsichernde Funktion übernehmen dürfen, da sie nicht splitterbindend sind. Der Vorteil bei Betrachtungen dieser Glasaufbauten besteht darin, dass keine weiteren Einflüsse aus einem möglichen Schubverbund (siehe 3.9.2) auftreten. In den Simulationen werden die maximal auftretenden Pendelkräfte berechnet. Es wird nicht berücksichtigt, ob die Verglasung dem Stoß aus 450 mm Fallhöhe ohne Glasbruch widerstehen kann. Das Kriterium der maximal auftretenden Pendelkraft zum Vergleich verschiedener Berechnungen hat den Vorteil, dass der Ort dieser Einwirkung mit dem Auftreffort zusammenfällt und damit bekannt ist. Spannungs- oder Verformungsmaxima treten bei verschiedenen Geometrien an unterschiedlichen Orten und zu verschiedenen Zeiten auf und lassen sich nicht ohne weiteres vergleichen. In der Regel bedeutet eine Zu- bzw. Abnahme der Stoßkörperkraft eine Zu- bzw. Abnahme der Verformungen und auch der Beanspruchungen des Glases.

3.6.4.1 Konvergenzstudien

Mit dem Einfluss der Netzfeinheit wird das Konvergenzverhalten der Simulation geprüft. Der Anprall eines Stoßkörpers auf eine allseitig gestützte rechteckige Glastafel mit den Abmessungen von 1.050 mm x 2.056 mm ($b \times h_G$) und einer Nenndicke von 8 mm ESG wurde in mehreren Berechnungsläufen mit unterschiedlicher Elementanzahl simuliert (Bild 3.24).

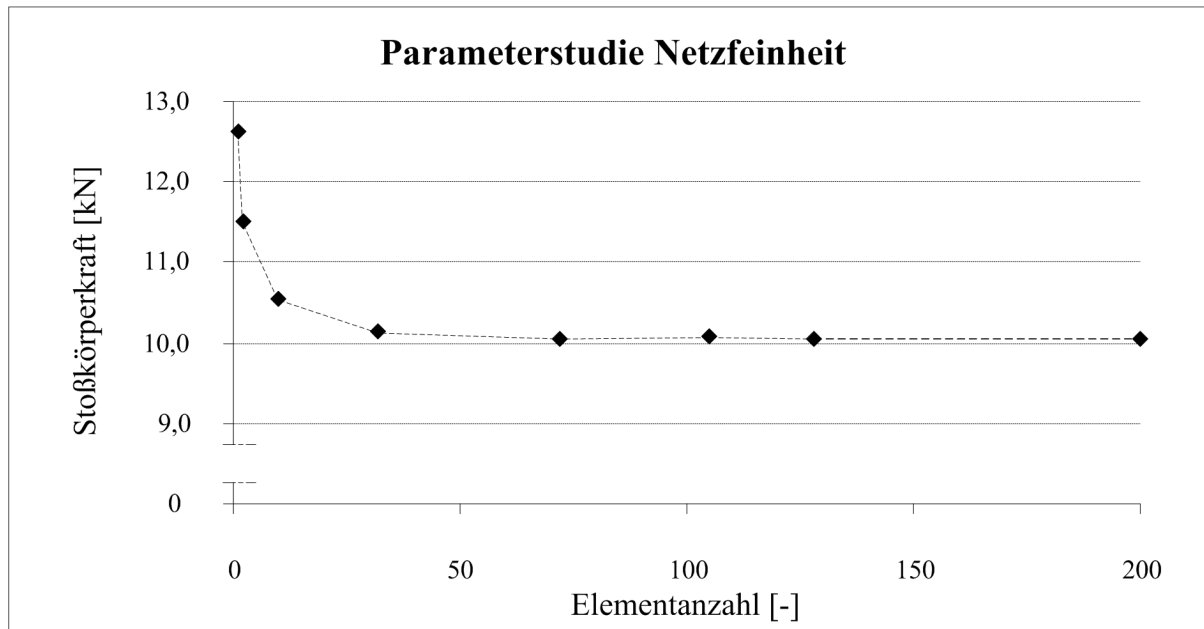


Bild 3.24: Konvergenzstudie zur erforderlichen Netzfeinheit bei SJ MEPLA

Bei mehr als fünfzig Elementen (5×10), gleichmäßig verteilt über die Ansicht, konvergiert die Lösung gegen das spezifische Minimum der Pendelkraft für eine bestimmte Glastafel. Die Ansatzfunktionen der Elemente wurden speziell für Glasanwendungen programmiert, deshalb konvergieren die Ergebnisse bereits mit „geringen“ Elementanzahlen (siehe Bild 3.24).

Ein Modell der Glastafel mit zu geringer Elementanzahl, in Bild 3.24 unter 50, bildet die Steifigkeit, das Verformungsverhalten und die wirksame Masse der Platte während des Stoßvorgangs nicht ausreichend realistisch ab. Der Grenzwert der Kraft, die auf den Stoßkörper wirkt, der ausgehend von einer Fallhöhe von 450 mm gegen eine starre Wand prallt, wurde in [Wö 99] mit 13,9 kN ermittelt. Die asymptotische Annäherung an den Grenzwert ist in Bild 3.24 für kleine Elementanzahlen sichtbar. Die realistische Stoßkörperkraft wird für das gewählte Beispiel bei ca. 10 kN liegen.

Bei einem Ansatz von über 100 Elementen ergibt sich eine geringe Zunahme der Pendelreaktionskraft. Aufgrund der Vernetzung trifft der Stoßkörper in dieser Simulation mittig auf ein Element. Lokal um den Auftreffort wird deshalb ein unrealistisches Verformungsverhalten der Platte beschrieben. Es werden unterschiedliche Ergebnisse berechnet, falls der Auftreffort auf bzw. zwischen Elementen liegt. Der Auftreffort des Pendels sollte zwischen Elementen liegen, damit ein realistisches Verformungsverhalten der Glastafel abgebildet werden kann. Für die weiteren Parameterstudien werden FE – Modelle mit 128 Elementen verwendet. Da sich die Glastafel infolge des Stoßes verformt, liegen die Beschleunigungen des Pendels unter dem Maximalwert eines Stoßes gegen die starre Wand.

3.6.4.2 Einfluss des Elastizitätsmoduls

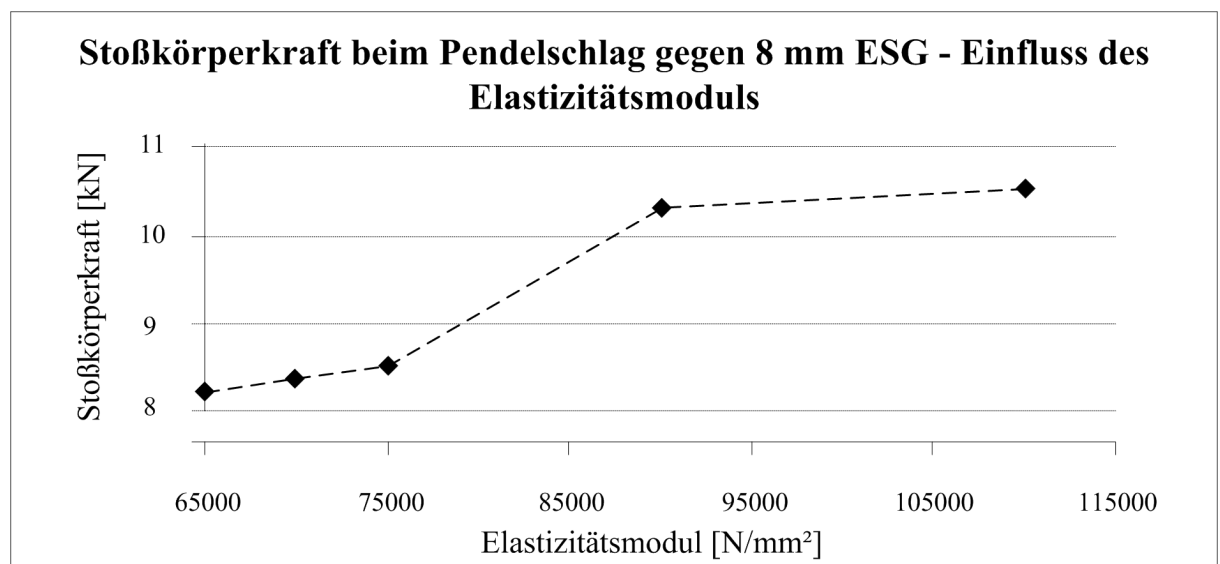


Bild 3.25: Einfluss des Elastizitätsmoduls

DIN 1249-10 gibt „... Richtwerte ...“ für den Elastizitätsmodul von Kalknatrongläsern, die im Floatverfahren hergestellt wurden, mit 70.000 N/mm² für vorgespanntes Glas und 73.000 N/mm² für SPG vor. Die TRLV und TRAV schreiben einheitlich 70.000 N/mm² vor. Vergleichsberechnungen an einer rechteckigen, 8 mm dicken Glastafel mit den Abmessungen

1.050 mm x 2.056 mm haben gezeigt, dass sich die Pendelreaktionskraft bei 450 mm Fallhöhe bei einem monolithischen Glas und einer Variation der Zahlenwerte innerhalb der Grenzen der Norm um 1,5 % ändert. Erst bei Steifigkeiten über 75.000 N/mm² steigt die berechnete Pendelkraft deutlich an. Im Rahmen der weiteren Parameterstudien wird mit einem mittleren Elastizitätsmodul von 70.000 N/mm² gerechnet (Bild 3.25).

3.6.4.3 Einfluss der Tafelaufbauten

Die wirksame Masse und die Steifigkeit der Verglasung sind vom Glasaufbau abhängig. Bei VSG nimmt die Pendelkraft mit der Tafeldicke zu (Bild 3.26). Bei MSI ergibt sich über das eingeschlossene Gasvolumen eine Wechselwirkung zwischen der inneren und äußeren Glastafel. Hier nehmen die berechneten Pendelkräfte nicht mehr einheitlich mit der Glasdicke zu. Bei dünnen Glasaufbauten führt das Schwingverhalten der Einzeltafeln zu Versteifungen, die eine höhere Pendelkraft zur Folge haben. VSG – Aufbauten verhalten sich steifer, als mit gleicher Glasdicke aufgebaute Mehrscheiben – Isoliergläser Bild 3.26.

Die Parameterstudie mit unterschiedlichen Glasaufbauten zeigt, dass auf den anprallenden Stoßkörper beim Anprall auf dünne Glastafeln mit geringer Steifigkeit niedrigere Einwirkungen auftreten. Ein anprallender Mensch könnte von einer nachgiebigen Konstruktion „sanfter“ aufgefangen werden.

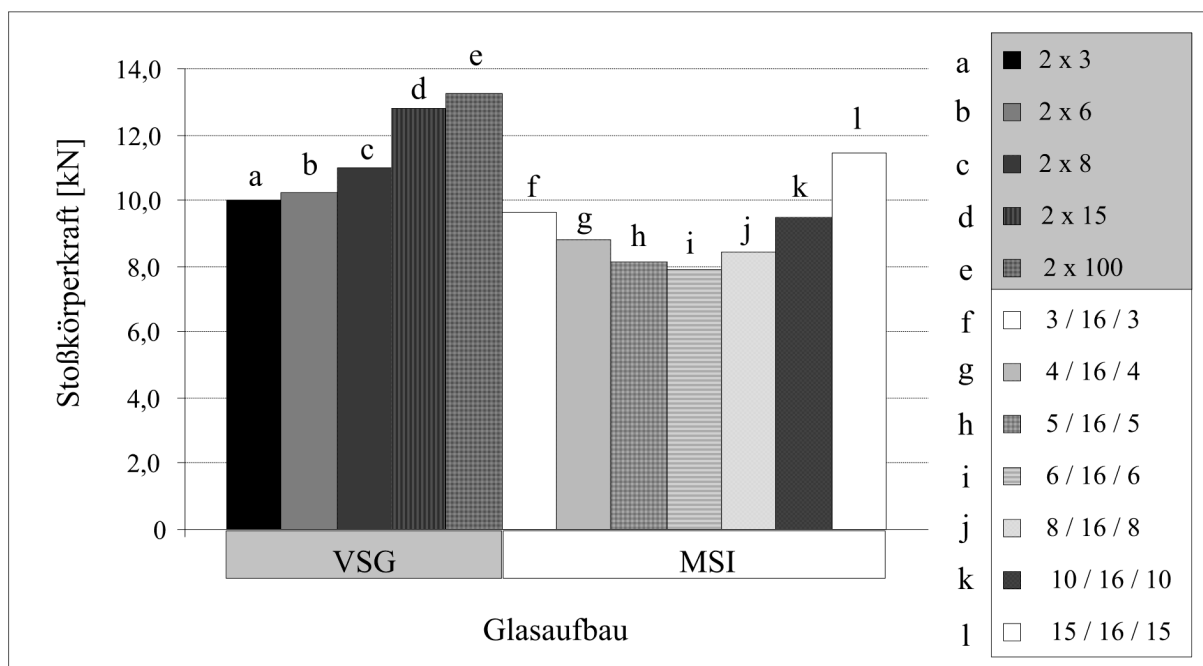


Bild 3.26: Einfluss des Tafelaufbaus auf die Stoßkörperkraft

3.6.4.4 Einfluss der Tafelbreite

Die in Bild 3.29 dokumentierten Berechnungsergebnisse basieren auf der Annahme, ein einheitlicher Auftreffort auf halber Tafelhöhe mit 525 mm Abstand zum Glastafelrand (Bild 3.27).

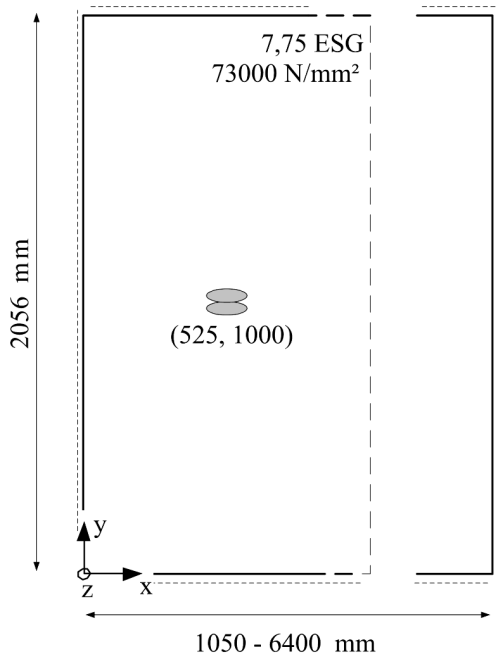


Bild 3.27: Geometrie für die Betrachtungen mit einseitig verlängerter Glastafel

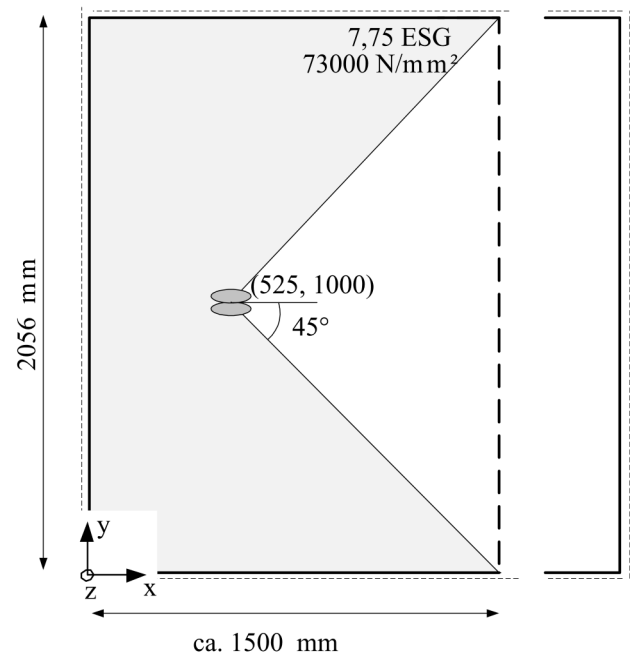


Bild 3.28: Lastabtrag einer breiten Glastafel

Für weitere Untersuchungen wird die Tafel einseitig verlängert. Bei schmalen Glastafeln beteiligen sich alle gelagerten Glaskanten am Lastabtrag. Wird eine Lastausbreitung unter einem Winkel von 45° unterstellt, wird die einwirkende Kraft in diesem Beispiel in die im Bild 3.28 markierten Lagerbereichen eingeleitet. Bis zu einer Breite von ca. 1.500 mm wird die Konstruktion mit zunehmender Breite weicher, geringere Stoßkörperkräfte sind die Folge (siehe Bild 3.29). Über einer Tafelbreite von 1.500 mm ändert sich die vom Stoß unmittelbar betroffene Einflussfläche kaum. Die Stoßkörperkraft bleibt nahezu unverändert. Auch bei Mehrscheiben – Isolierglas nimmt die Stoßkörperkraft mit der Tafelbreite ab (siehe Bild 3.30).

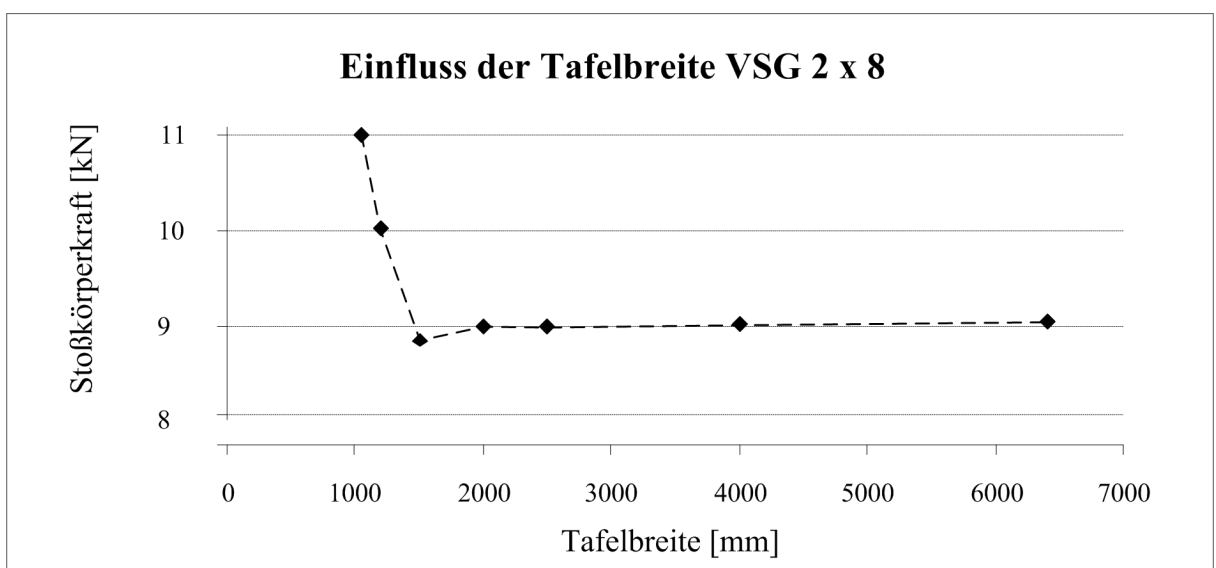


Bild 3.29: Einfluss der Tafelbreite bei VSG

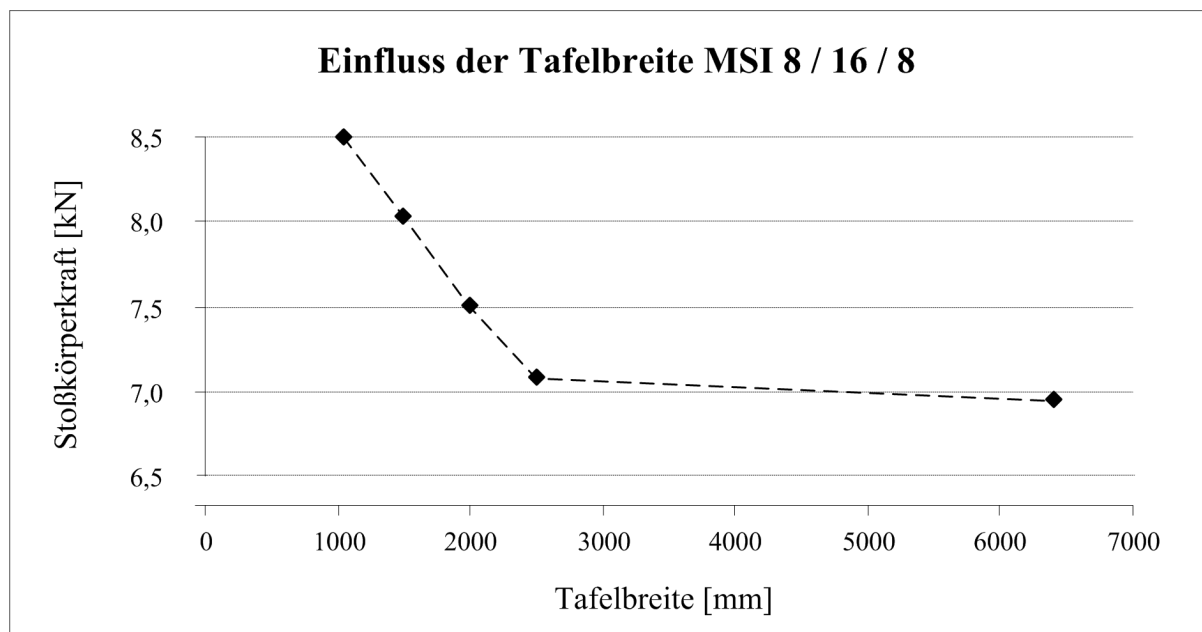


Bild 3.30: Einfluss der Tafelbreite bei MIG

3.6.4.5 Einfluss der generalisierten Masse

Der Einfluss der generalisierten Masse wurde unter Ansatz verschiedener Werkstoffdichten untersucht. Die Dichte hat keinen Einfluss auf die Plattensteifigkeit. In der nachfolgenden Parameterstudie ist eine allseitig gelagerte Glastafel mit den Abmessungen 1.050 mm x 2.056 mm untersucht worden. Ausgehend von der realen Werkstoffdichte von Glas mit $2,55 \cdot 10^{-9} \text{ to/mm}^3$ wurde die Dichte mit dem Faktor 10 reduziert bzw. 10 erhöht und die Plattendicke jeweils konstant gehalten. Die berechneten Stoßkörperkräfte sind in Bild 3.31 dokumentiert. Bei einer Veränderung der Dichte um den Faktor 10 verändern sich die Stoßkörperkräfte nicht wesentlich. Der größte Einfluss zeigt sich bei der leichtesten Platte. Berechnet man mit einem linearen Ansatz den Faktor Gesamtmasse / lineare Plattensteifigkeit (Einzellast in Tafelmitte) ergeben sich die in Tabelle 3.15 dargestellten Faktoren.

Tabelle 3.15: Massen- Steifigkeitsverhältnisse der Glastafeln

Glastafeldicke t [mm]	Verhältnis Gesamtmasse/linearer Steifigkeit [kg s ² m/ kg m]
5	6,4
8	2,5
12	1,1
24 (2 x 12)	0,3

Für 5 mm dicke Glastafeln wurde der größte Einfluss der Werkstoffdichte berechnet. Deshalb sind in Bild 3.32 zusätzlich die maximalen Biegezugspannungen für verschiedene Werkstoffdichten ausgewertet. Die Parameterstudie belegt, dass schwerere und damit trägere Glastafeln beim Anprall mit dem gleichen Stoßkörper geringer beansprucht werden.

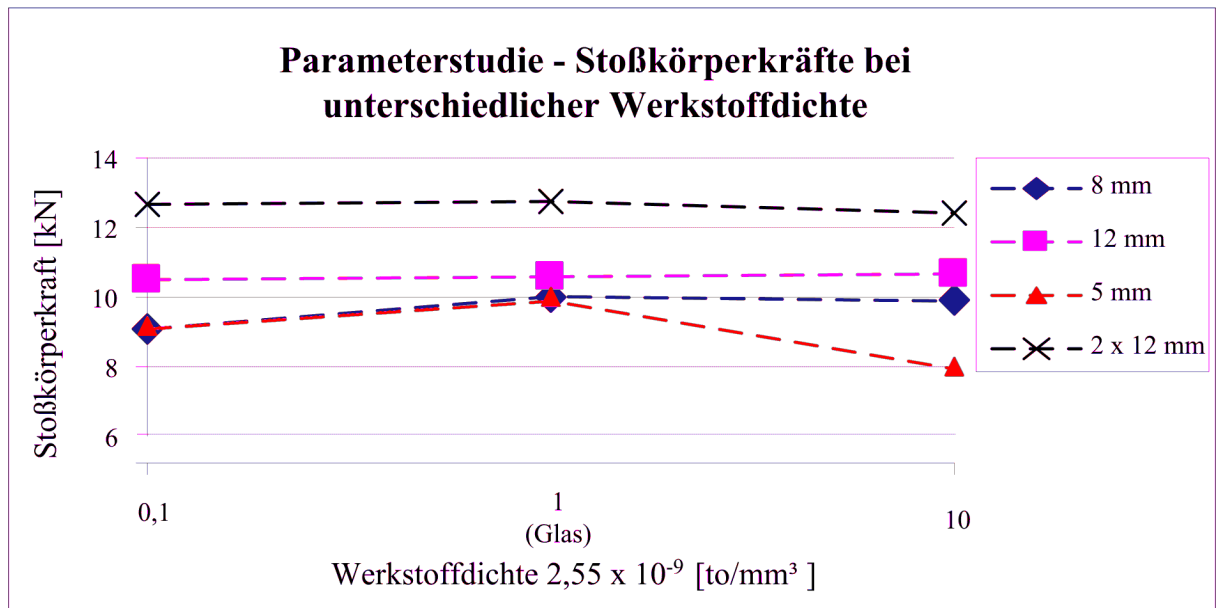


Bild 3.31: Einfluss der Werkstoffdichte

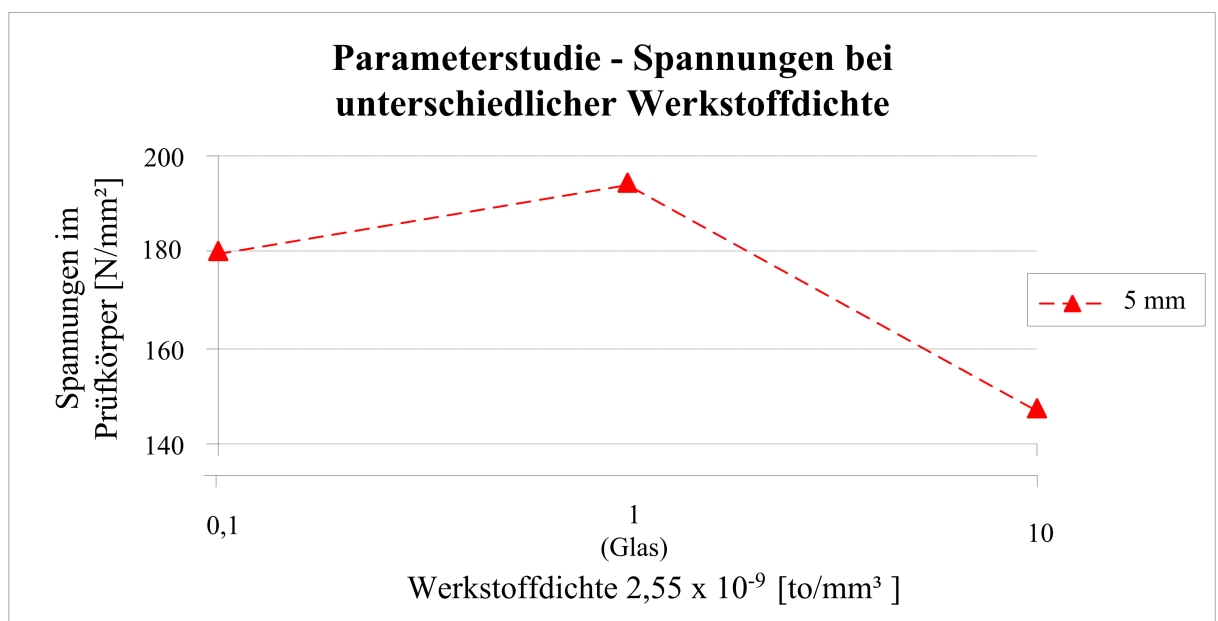


Bild 3.32: Einfluss der Werkstoffdichte, Detailausschnitt

3.6.4.6 Einfluss des Auftreffortes

Die Art der Schwingung der angestoßenen Glastafel und die Höhe der Amplitude werden vom Auftreffort des Stoßkörpers mit beeinflusst. In dieser Studie werden die Anschlaghöhen des Stoßkörpers entlang zweier gedachter Linien parallel zum Randlager bei $x = 250$ mm und $x = 500$ mm verschoben (Bild 3.33). Bei einer Glastafel aus 7,75 mm ESG mit den Abmessungen 1.050 mm x 2.056 mm und einem E – Modul von 73.000 N/mm² zeigte sich, dass in Randnähe ($x = 250$ mm) das freie Schwingen der Platte wegen der Nähe zum Linienlager stärker behindert ist, als bei einem Auftreffort mit größerem Abstand zum Lager. Der Lastabtrag erfolgt maßgeblich über die zwei nächstgelegenen Scheibenkanten. Wandert der Auftreffort zur

Scheibenmitte, nimmt die Verformungsmöglichkeit des Prüfkörpers zu. Damit verbunden ist eine Abnahme der Stoßkörperkraft (siehe gestrichelter Verlauf in Bild 3.34).

Bei $x = 500$ mm und y -Werten bis ca. 600 mm ergibt sich zunächst ein Lastabtrag über die nahe gelegenen Glaskanten ohne eine große Verformungsmöglichkeit der Platte. Hohe Stoßkörperkräfte sind die Folge. Wird der Auftreffort weiter in Richtung Tafelmitte verschoben, kann die Glastafel nach dem Anprall des Stoßkörpers ungehemmter schwingen. Die Stoßkörperkraft sinkt auf ein Minimum beim Auftreffort in halber Tafelhöhe (siehe Bild 3.34 durchgezogene Linie).

Parameterstudie zum Einfluss der Auftreffhöhe

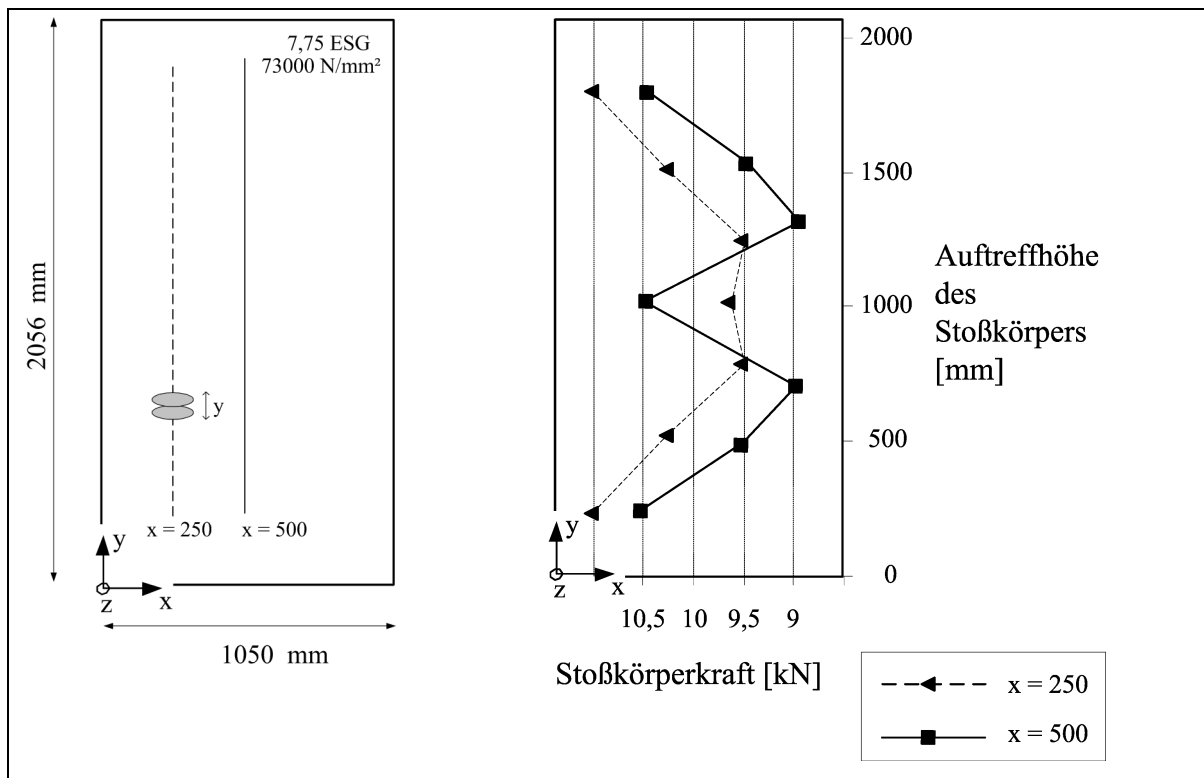


Bild 3.33: Geometrie zur Parameterstudie
Auftreffhöhe

Bild 3.34: Stoßkörperkraft in Abhängigkeit der Auftreffhöhe

Die halbe Tafelhöhe bildet eine Symmetrieachse für das Stoßereignis, da bei gleichem Abstand über bzw. unter dieser Achse jeweils gleiche Massen- und Steifigkeitsverhältnisse vorliegen. Es stellt sich ein symmetrischer Stoßkörperkraftverlauf ein (Bild 3.34). Beim randnahen Auftreffort trägt die angrenzende Lagerung die Stoßkräfte maßgeblich ab. Das Maximum der Stoßkörperkraft wird beim Anprall in der steifen Ecke berechnet (Bild 3.34, gestrichelter Verlauf). Bei Auftrefforten auf der Linie bei $x = 500$ mm werden die in Bild 3.34, durchgezogene Verlauf, dargestellten Stoßkörperkräfte berechnet.

In einer zweiten Studie wird der Auftreffort über der gesamten Glastafel verschoben. Zahlreiche Pendelschlagversuche mit einer Fallhöhe von 450 mm werden auf eine rechteckige Glastafel mit den Abmessungen 3.200 mm x 6.400 mm und einer Dicke von 12 mm simuliert. Die Auftrefforte werden im quadratischen Raster mit 250 mm Kantenlänge über die Glastafel

verschoben. Es werden Spannungen zwischen 60 und 95 N/mm² berechnet. Die berechneten Stoßkörperkräfte sind ähnlich einer Höhenliniendarstellung einer Landkarte in Bild 3.35 dargestellt. Bei steifen Auftrefforten am Rand oder in den Ecken treten größere Kräfte auf.

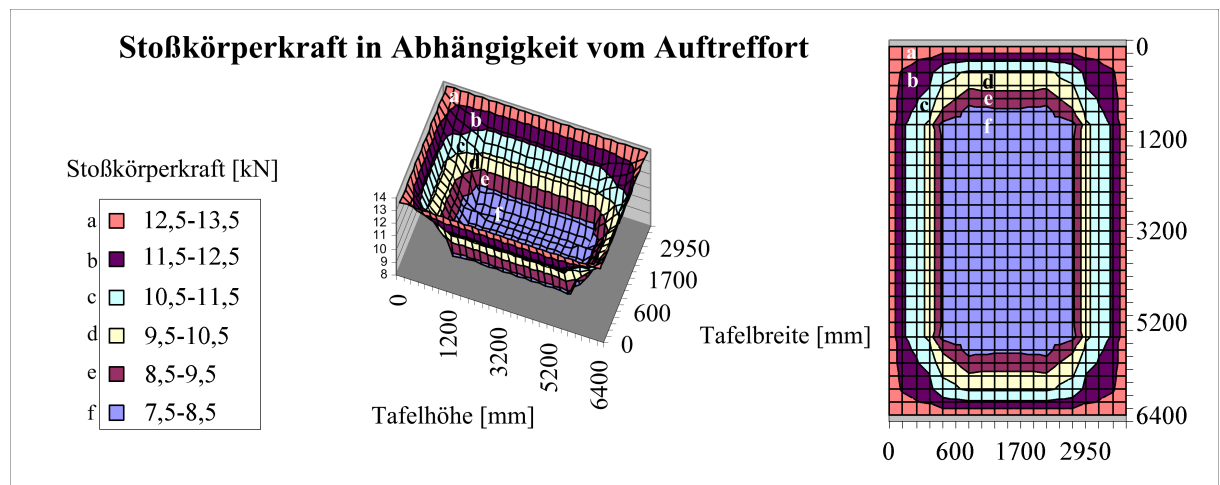


Bild 3.35: Einfluss des Auftreffortes

3.6.4.7 Einfluss der Unterkonstruktion

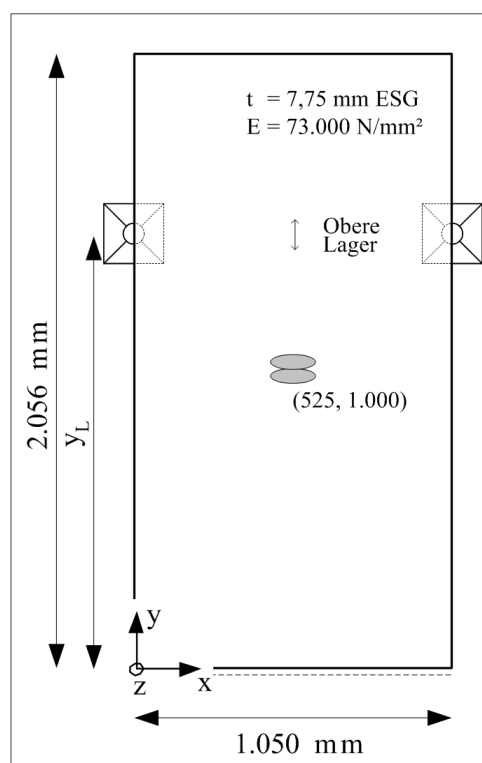


Bild 3.36: Erläuterungen zum Einfluss der Unterkonstruktion

Annahmen:

$E = 73.000 \text{ N/mm}^2$

Glastafeldicke

7,75 mm

Die Lager (z. B. Randklemmhalter oder Diagonale eines Prüfrahmens) werden vertikal (y_L) verschoben.

Der Auftreffort in Tafelmitte mit den Koordinaten (525 mm / 1.000 mm) wird nicht verändert.

Neben der Glastafel verformen sich auch nachgiebige (elastische) Unterkonstruktionen unter der Einwirkung des Stoßes. Ein Teil der eingetragenen Energie wird dann von der Unterkonstruktion aufgenommen. Das Glas selbst wird hierdurch geringer beansprucht als bei einer starren Unterkonstruktion. Die nachfolgend simulierte Tafel ist an der Unterkante gelenkig liniengelagert. Die oberen Haltepunkte (Diagonale im Prüfrahmen) werden in der Parameterstudie verschoben. Der Auftreffort des Stoßkörpers ist bei allen Berechnungen konstant bei $y = 1.000 \text{ mm}$

gewählt. Der vertikale Abstand y_L zwischen den Lagern wird von der Unterkante der Tafel bis zur Verbindungslinie der oberen Auflager gemessen. In Bild 3.37 und Bild 3.38 ist der vertikale Abstand y_L als horizontale Achse („oberes Lager bei y_L “) eingezeichnet.

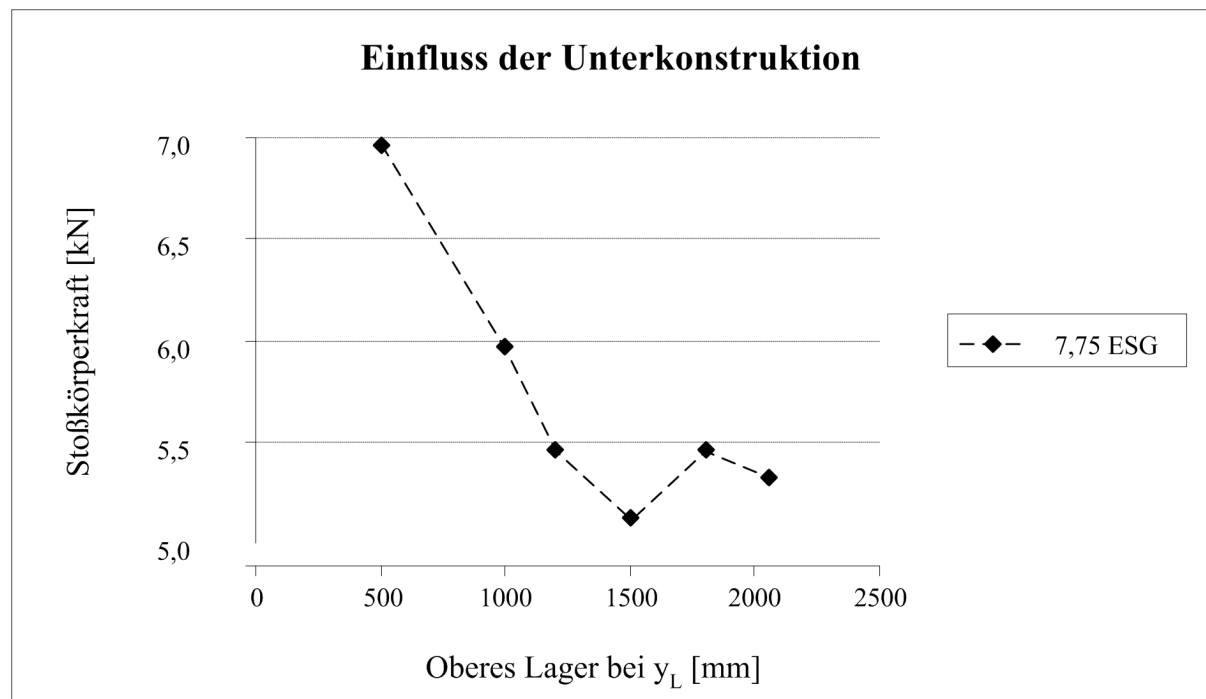


Bild 3.37: Einfluss der Unterkonstruktion

Liegt der obere Haltepunkt in der Nähe des Auftreffortes (500 mm bis 1.000 mm) wird die Unterkonstruktion steifer, höhere Stoßkörperkräfte sind die Folge, Bild 3.37. Für MSI ist der Kraftverlauf in Bild 3.38 dargestellt.

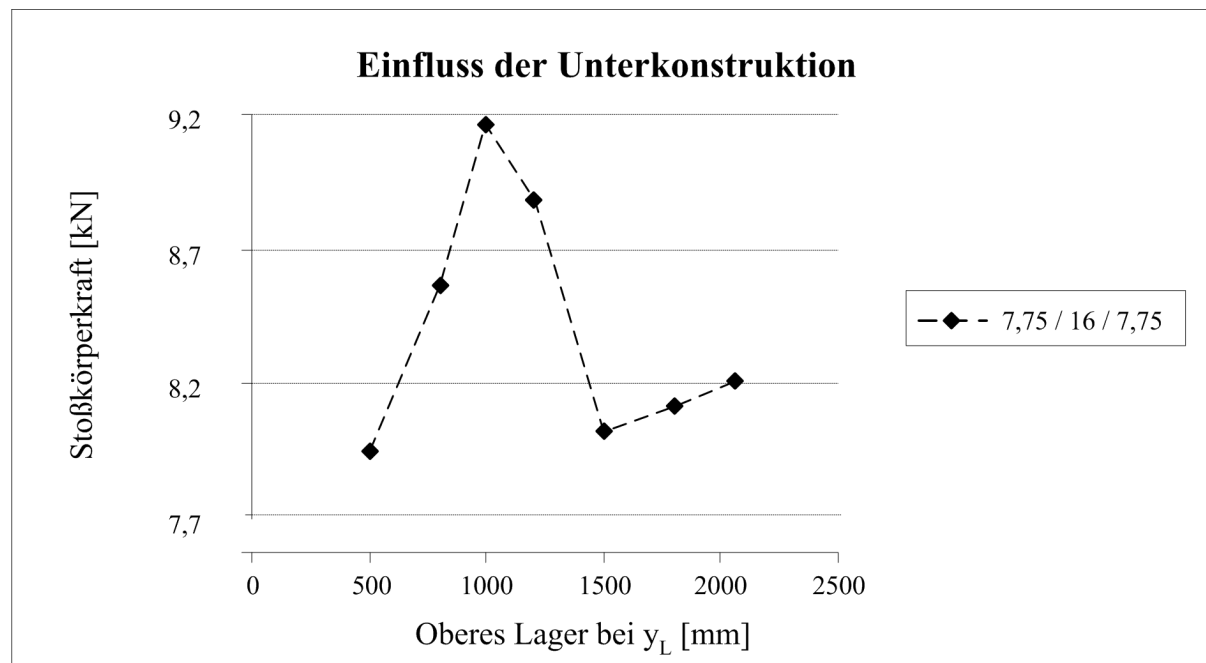


Bild 3.38: Einfluss der Unterkonstruktion bei MIG

3.6.5 Einfluss der Lagersituation

Die Steifigkeit der Lagerung beeinflusst das Stoßereignis zusätzlich. Steifer gelagerte Glastafeln sind einem kurzen harten Stoß ausgesetzt, weichere Unterkonstruktionen verlängern den Stoßverlauf. Geringere Glastafelbeanspruchungen, geringere Stoßkörper- bzw. Lagerkräfte sind die Folge. Die Steifigkeit der elastischen Gummilagerungen kann aus den Angaben der Shore Härte mit der Formel (3.19) abgeschätzt werden. Der Einfluss der nachgiebigen Lagerung ist in Bild 3.54 dargestellt.

3.6.6 Verteilung der Auflagerkräfte

Häufig versagen unzureichend befestigte Glashalteleisten (Pressleisten) im Bauteilversuch. In der nachfolgenden Studie werden die in Linienlagern auftretenden Kräfte berechnet. Untersucht wird der Anprall des Stoßkörpers in der Ecke einer Glastafel mit den Abmessungen 8 mm x 1.050 mm x 2.056 mm.

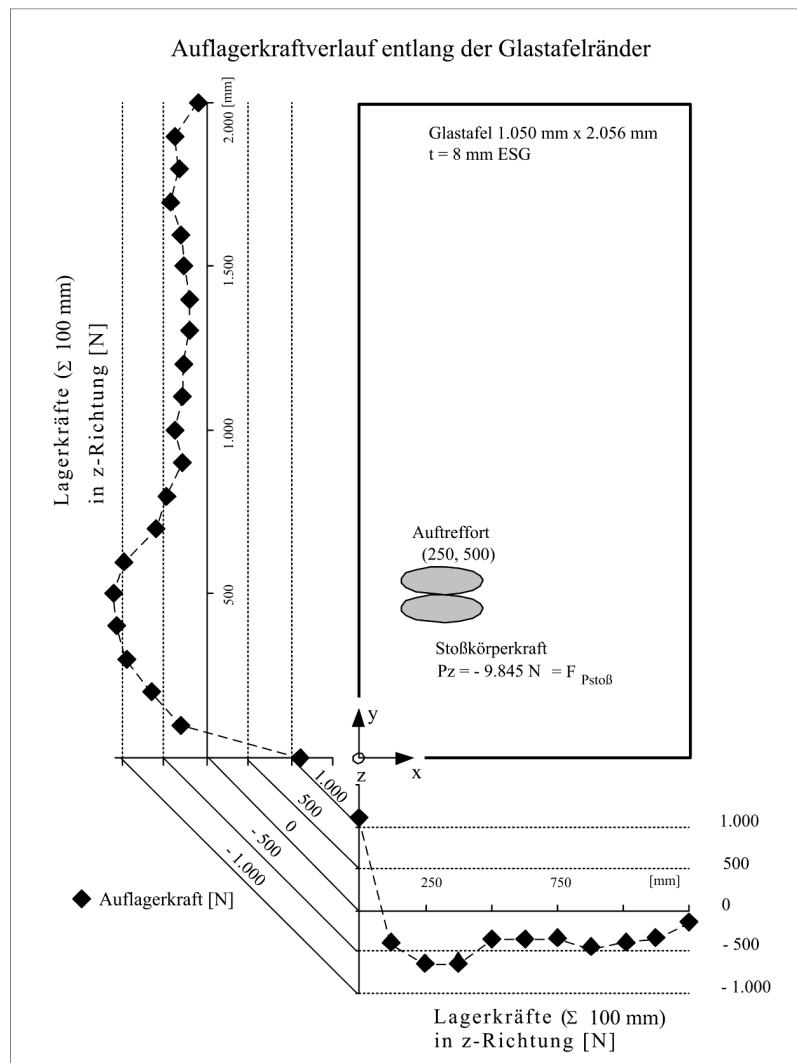


Bild 3.39: Verlauf der Auflagerkräfte entlang des Scheibenrandes

In der nachfolgenden Parameterstudie wird die Auflagerkraft jeder Pressleiste in Abschnitten mit 100 mm Länge ausgewertet. Die in den einzelnen Abschnitten ermittelten nichtlinearen Kräfteverteilungen werden durch abschnittsweise Integration zu Resultierenden zusammengefasst. Damit lässt sich der Ort der lokal größten Kräfte im Linienlager angeben. Die in Bild 3.39 dargestellten Ergebnisse der Parameterstudie belegen, dass am Tafelrand hohe Auflagerkräfte entgegen der Schlagrichtung auftreten. Infolge der Drillmomente in der Platte drücken die „abhebenden“ Ecken gegen die Schlagrichtung. Es ist sinnvoll, die Enden der Glashalteleisten im engeren Abstand mit der Unterkonstruktion zu verschrauben.

3.6.7 Energieverteilung beim Stoß

Im Programm SJ MEPLA Version 2.5.0 werden die Energieanteile der beteiligten Stoßpartner nicht ausgewertet. Energie dissipierende Effekte wie Reibung oder Wärmeeffekte bleiben bei der Berechnung ohnehin unberücksichtigt. Für die vorliegende Arbeit wurde daher eine Auswertemethode in EXCEL programmiert. Damit lassen sich die Energieanteile der Glastafel und des Stoßkörpers zu jedem Zeitpunkt während des Stoßes auswerten. Beim Aufschlag auf die Glastafel wird der Stoßkörper zusammengedrückt, die Glastafel beginnt sich zu verformen und wird beschleunigt. Er speichert einen Teil der Energie, die er, falls es der Stoßverlauf gestattet und er nicht frühzeitig den Kontakt infolge Schwingungen der Glastafel verliert, wieder auf diese überträgt. SJ MEPLA legt während der graphischen Auswertung von Verläufen im Arbeitsverzeichnis ein ASCII – file „sj_mepla.lst“ an. Aus den Kraft – Zeit – und Beschleunigungs – Zeit – Verläufen des Stoßkörpers lassen sich mit dem bekannten Verformungsverhalten des Stoßkörpers (3.6) dessen Energieanteile während des Stoßes berechnen. Zieht man diese Anteile von der Ausgangsenergie des Stoßkörpers ab, erhält man die auf die Glastafel übertragene Summe der kinetischen und elastisch gespeicherten Energie. Für eine 3 mm dicke ESG-Tafel mit den Abmessungen 1.050 mm x 2.056 mm und 450 mm Fallhöhe bei mittigem Auftreffort ergibt sich die in Bild 3.40 dargestellte Energieverteilung.

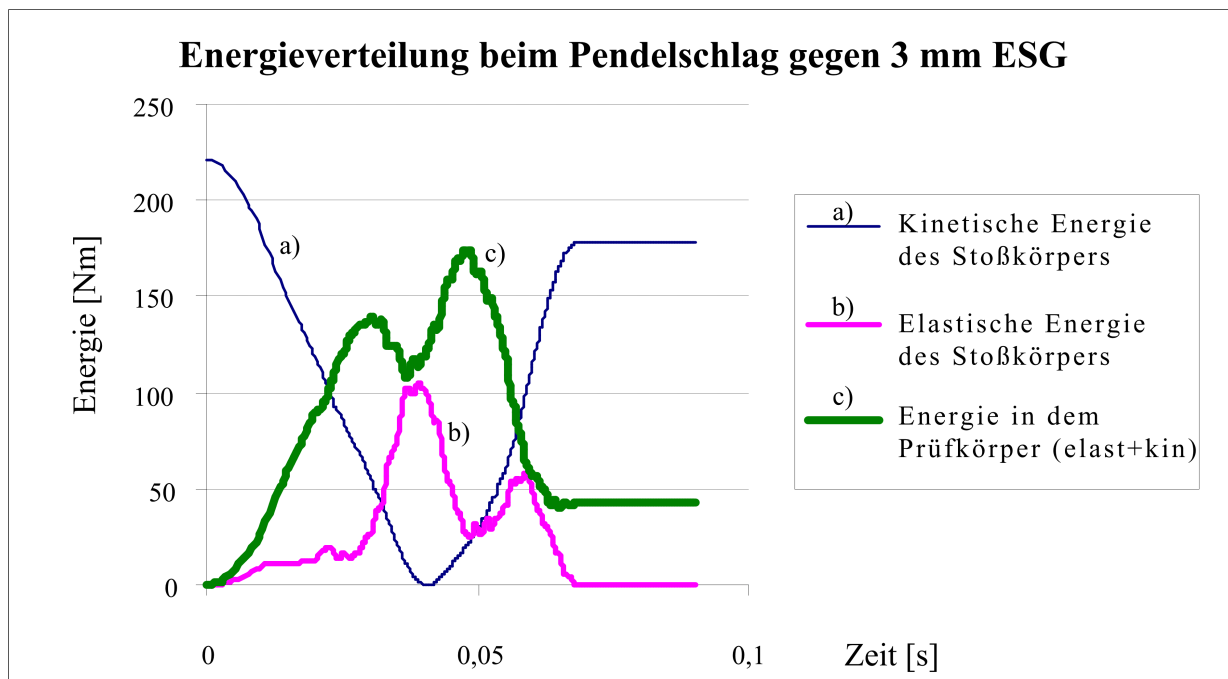


Bild 3.40: Energieanteile beim Stoßvorgang 3mm ESG mit SJ MEPLA

In der Kompressionsphase wird der Stoßkörper zusammengedrückt und ein Teil der Energie in die Glastafel eingetragen. Der Stoßkörper wird vollständig gestoppt, seine kinetische Energie ist übertragen. Bei der betrachteten dünnen Tafel verliert der Stoßkörper frühzeitig den Kontakt zum Glas und die im Glas elastisch gespeicherte Energie kann nicht mehr auf den Stoßkörper zurückübertragen werden. Die Rückprallhöhe des Stoßkörpers ist entsprechend geringer.

3.7 Simulation des Stoßvorganges mit LS-DYNA

3.7.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Stoßkörperanprall auf Glastafeln mit dem FE – Programmsystem LS-DYNA simuliert. Dabei werden die Bewegungsgleichungen explizit gelöst, das heißt im aktuellen Zeitschritt werden die Gleichungen gelöst und davon ausgehend werden die Verschiebungen des nächsten Zeitschritt berechnet. Das Programm eignet sich insbesondere für strukturmechanische Untersuchungen in der Kurzzeitdynamik. Das Problem eines auf einen Prüfkörper anprallenden Menschen oder Stoßkörpers ist nichtlinear. Je nach Fragestellung sind verschiedene Nichtlinearitäten zu berücksichtigen:

- geometrische Nichtlinearitäten: Theorie II. Ordnung, große Verformungen, große Dehnungen (Glastafel unter Stoßeinwirkung)
- nichtlineares Werkstoffverhalten: Plastizität, Hyperelastizität, Viskoelastizität (Gummilager, Nachbruchverhalten bei VSG)
- strukturelle Nichtlinearitäten: Kontaktelemente starr-elastisch, elastisch-elastisch (Anprallfläche zwischen Stoß- und Prüfkörper)

Im Rahmen realistischer FE – Simulationen eines auf einen Prüfkörper anprallender Stoßkörper, sind diese Effekte zu berücksichtigen. Die Arbeiten von Kolling [Ko 04] belegen, dass sich das Bruchverhalten von VSG simulieren lässt. Allerdings sind die Ergebnisse stark netzabhängig und beschreiben vor allem die Reststeifigkeiten der gebrochenen Glastafel. Rechnerische Abschätzungen über den Beanspruchungszustand der Folie oder die Entwicklung des Rissverlaufes im gebrochenen Zustand sind bisher nicht möglich. Für die Anwendungen im konstruktiven Glasbau und besonders für das Ziel dieser Arbeit, Glastafeln rechnerisch sicher nachzuweisen, wird das Glas nur im linear-elastischen Bereich bis zum charakteristischen Wert der Baustoffeigenschaften ausgenutzt.

Die Genauigkeit der Rechenergebnisse hängt bei LS-DYNA von zahlreichen Faktoren - Zeitschritten und Konvergenzkriterien - ab. Typischerweise begrenzt das kleinste Element im expliziten FE – Code die Rechenschrittlänge. Hier durchgeführte Vergleichsberechnungen mit einfacher und doppelter Rechengenauigkeit (auf einem 32 bit - System) bestätigen für die Simulation des Pendelschlages, dass mit einfacher Rechengenauigkeit gearbeitet werden kann.

3.7.2 Abbildung des Stoßkörpers als detailliertes FE – Modell

Für die Berechnungen dieser Arbeit wurde ein FE – Modell des Stoßkörpers aufgebaut, das die Eigenschaften und geometrischen Randbedingungen realitätsnah beschreiben kann (siehe Bild 3.41). Das FE – Netz des unverformten Stoßkörpers ist im linken Abschnitt von Bild 3.41 dargestellt. Rechts ist der Stoßkörper als Schnitt im Kontakt mit einer MSI-Glastafel dargestellt. Die unterschiedlich verformten Glastafeln und die Deformation der Reifen sind offensichtlich.

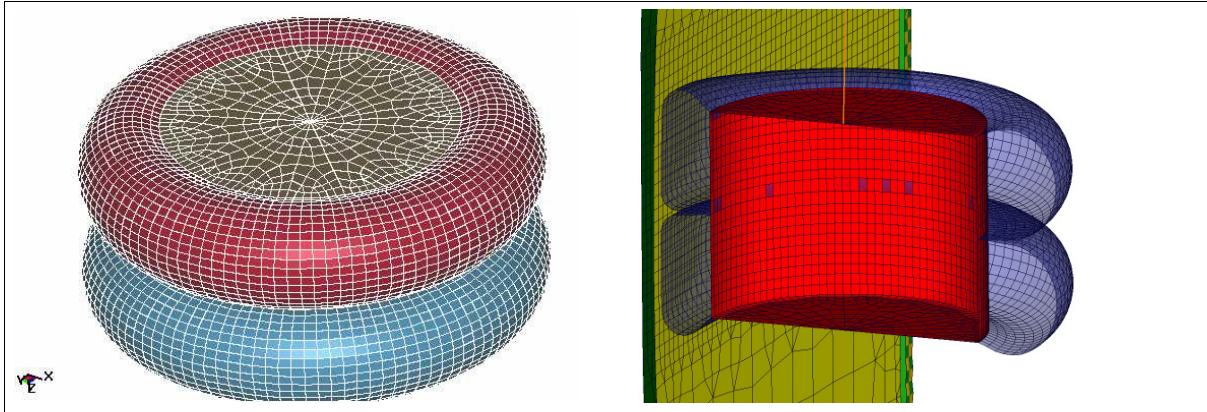


Bild 3.41: Finite Elemente Modell des Stoßkörpers mit Vernetzung

Mögliche Störeinflüsse infolge vereinfachter Ersatzstoßkörpereigenschaften, abgebildet als linear-elastische Kugel- oder Zylinderausschnitte, wie sie in [Rü 02a] und [Sc 01] verwendet wurden, können mit der aufwändigeren FE – Modellierung des Stoßkörpers mit luftgefüllten Reifen vermieden werden. Die Knoten und Elemente, welche die Geometrie des Pendels entsprechend den Vorgaben von DIN EN 12600 beschreiben, werden mit einem beliebigen Preprozessor modelliert (Bild 3.2). Der Stoßkörper setzt sich aus mehreren Einzelteilen zusammen. Über eine Gewindestange werden zwei Reifen auf Felgen und die Zusatzgewichte zusammengehalten. Der Stoßkörper ist zweifach achsensymmetrisch. Das Anprallproblem wird in einem Gleichungssystem beschrieben und mit expliziten Lösungsverfahren berechnet. Für das vorliegende Problem werden mit einfach oder doppelt genau berechnender Version übereinstimmende Ergebnisse berechnet. Die einzelnen Stoßkörperteile, wie Reifen und Gewichte, werden ebenso wie die Glastafeln mit einpunkt – integrierten Schalenelementen nach Belytschko – Tsai abgebildet. Dieser Elementtyp hat sich für strukturelle Berechnungen bewährt. Es ist ein 4 –Knoten Schalenelement mit bilinearem Verschiebungsansatz. Das Element ist reduziert integriert, d.h. die Spannungen werden nur an einem Integrationspunkt in der Mitte des Elementes berechnet. Dadurch kann dieses Element energiefreie Deformationszustände (so genannte Hourglass Modes) einnehmen. Diese Deformationszustände werden mit entsprechenden Kontrollformulierungen vermieden. Der massive Stahlkorpus des Stoßkörpers wird als deformationssteif angenommen. Für die beiden Reifen wird ein rein elastisches Werkstoffverhalten angesetzt. Der Ausgangsluftdruck von 4 bar im Inneren der Reifen wird durch die skalare Zustandsgleichung für ideale Gase mit dem so genannten "Control – Volume" –Konzept abgebildet. Letzteres kommt insbesondere bei der Simulation von Airbags im Automobilbau in ähnlicher Form zur Anwendung. Dabei wird zu jedem Zeitpunkt während der FE – Simulation das Reifenvolumen aus der deformierten Geometrie ermittelt. Aus diesem Grund muss der Ausgangsdruck schrittweise erhöht werden, bis tatsächlich 4 bar Innendruck anliegen. Beim „Aufblasen“ der Reifen im ersten Lastschritt vergrößert sich das Volumen über die Nachgiebigkeit der elastischen Reifenhülle. Tatsächlich lässt sich das Volumen über den Gaußschen Integralsatz aus dem Oberflächenintegral des Reifens bzw. dessen Diskretisierung ermitteln. Mit der Beschränkung auf adiabatische Prozesse wird hier ein ideales Gas zugrunde gelegt, um die folgende Zustandsgleichung als Funktion der Dichte (3.20) angeben zu können:

$$p = (k - 1) \rho e \quad (3.20)$$

Hierin steht k für das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmekapazitäten der Luft und e für die spezifische interne Energie ($e = E / \rho_o$). Für zwei zeitlich benachbarte Zustände, nachfolgend mit dem Index 1 und 2 bezeichnet, gilt weiter

$$\frac{e_2}{e_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{k-1} \quad (3.21)$$

Damit lässt sich aus dem bekannten Volumen V_2 zum Zeitpunkt $t=t_2$, dem Volumen des vorhergehenden Zeitschrittes V_1 und der zugehörigen internen Energie e_1 , die aktuelle interne Energie e_2 und damit der augenblickliche homogen verteilte Luftdruck im Reifeninneren berechnen.

Der Reifeninnendruck und die damit verbundene resultierende Vorverformung der beiden Reifen des Versuchskörpers muss vor der eigentlichen Anprallsimulation (zum Zeitpunkt $t = 0$) über dynamische Relaxation berechnet werden. Damit ist der Reifeninnendruck aufgebracht. Während der zeitabhängigen Berechnung wird der Reifeninnendruck jeweils in Abhängigkeit des aktuell vorhandenen Volumens ermittelt.

Die in den Modellen verwendeten Werkstoffparameter können der Tabelle 3.16 entnommen werden. Die Steuerkarten der Eingabedatensätze (Decks) sind im Anhang A 14, aufgeführt.

Tabelle 3.16: Verwendete Elemente im LS-DYNA Modell

Bauteil	Elementart	Bemerkung
Glastafel	Schalen- oder Volumenelement	Dynamischer Elastizitätsmodul nach Abschnitt 3.9.1
Reifen oben	Schalenelement	Elastizitätsmodul 65 N/mm ²
Reifen unten	Schalenelement	Elastizitätsmodul 65 N/mm ²
Reifenüberzug	Schalenelement	Masse – und steifigkeitslose Kontaktschalen, nur bei Volumenelementierung des Glases
Massekörper	Schalenelement	Starr; Masse 50 kg; Trägheitsmomente
Aufhängeseil	Balkenelement	Länge 1.500 mm
Schrauben	Balkenelement	Verschraubung zwischen Prüfrahen und Pressleiste
Pressleisten	Schalenelement	Dicke 4 mm
Druckstange	Balkenelement	Prüfrahen
Randversiegelung	Volumenelement	Zusätzlich bei MSI
Aluminium-Abstandshalter	Volumenelement	

3.7.3 Validierung des Stoßkörpermodells

Die Validierung des Rechenmodells für den Stoßkörper erfolgt mit Stoßsimulationen gegen eine starre Wand. Einflüsse infolge der Nachgiebigkeit des Prüfkörpers und der Unterkonstruktion sind ausgeschlossen. Am Stoßkörper werden Zeit – Beschleunigungs – Verläufe für unterschiedliche Fallhöhen gemessen. Beim Stoß gegen die starre Wand tritt das jeweils zu dieser Fallhöhe gehörende Kraftmaximum im Stoßkörper auf. Das nichtlineare Steifigkeitsverhalten der luftunterstützten Reifenhülle beeinflusst den Beschleunigungsverlauf.

In Bild 3.42 sind für verschiedene Fallhöhen die Stoßkörperbeschleunigungen den Messergebnissen aus Versuchen gegenübergestellt. Die berechneten Kurvenverläufe sind bewusst nicht geglättet. Abhängig von der Netzfeinheit der Reifenoberfläche sind in den Beschleunigungsverläufen überlagerte Oszillationen ersichtlich. Die sich ausbreitende Kontaktfläche, die Elemente legen sich nacheinander am Glas an, ruft diese Schwingungen hervor. Diese Effekte könnten in der Ergebnisausgabe herausgefiltert werden. Da in der vorliegenden Arbeit die tatsächlichen Sachverhalte dargestellt werden, sind die Verläufe in Bild 3.42 bewusst nicht geglättet. Die Zahlenwerte der Legende in Bild 3.42 definieren die theoretische Fallhöhe, die dem Energieinhalt der Graphen entspricht, wenn die Geschwindigkeit des Stoßkörpers nach Formel (3.1) berechnet wird. Wird diese Startenergie in der Simulation (Bild 3.42, LS-DYNA) gewählt, werden die Ergebnisse des FE – Modells von den Messwerten bestätigt.

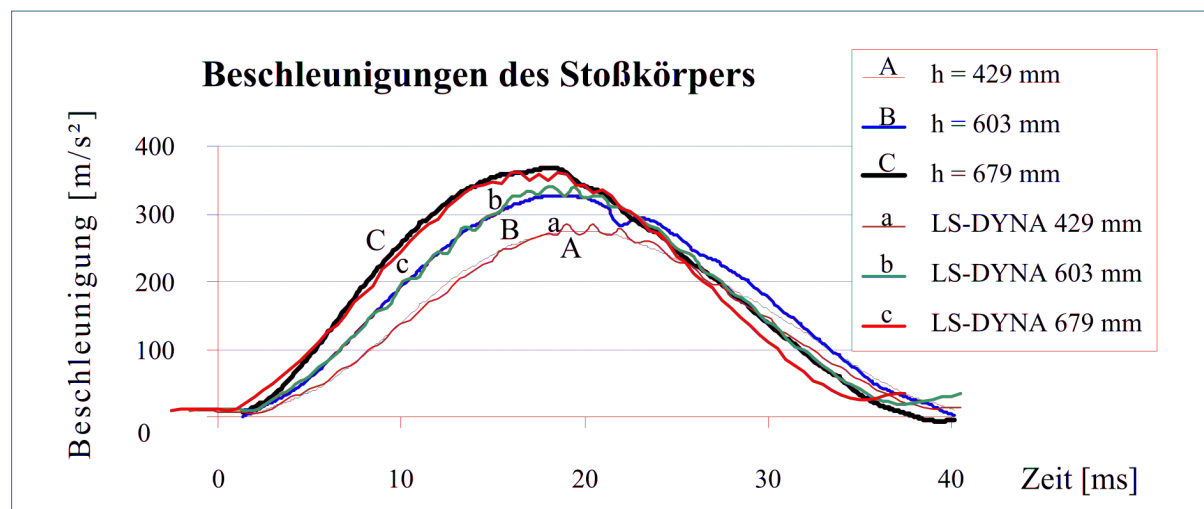


Bild 3.42: Vergleich der Modellierung des Stoßkörpers mit Messdaten aus [Sc 01]

Alle folgenden Untersuchungen werden mit der gleichen validierten Pendelmodellierung durchgeführt.

In Bild 3.43 ist die sich entwickelnden Kontaktflächen des Stoßkörpers auf der Glasoberfläche zu vier unterschiedlichen Zeitpunkten zusammengestellt. Bild 3.44 zeigt im Vertikalschnitt die Kompressions- und die Dekompressionsphase beim Stoß gegen eine 7,75 mm dicke ESG - Tafel. Die Glastafel ist lediglich oben und unten gelagert. Die Verformung der Tafel ist deutlich erkennbar.

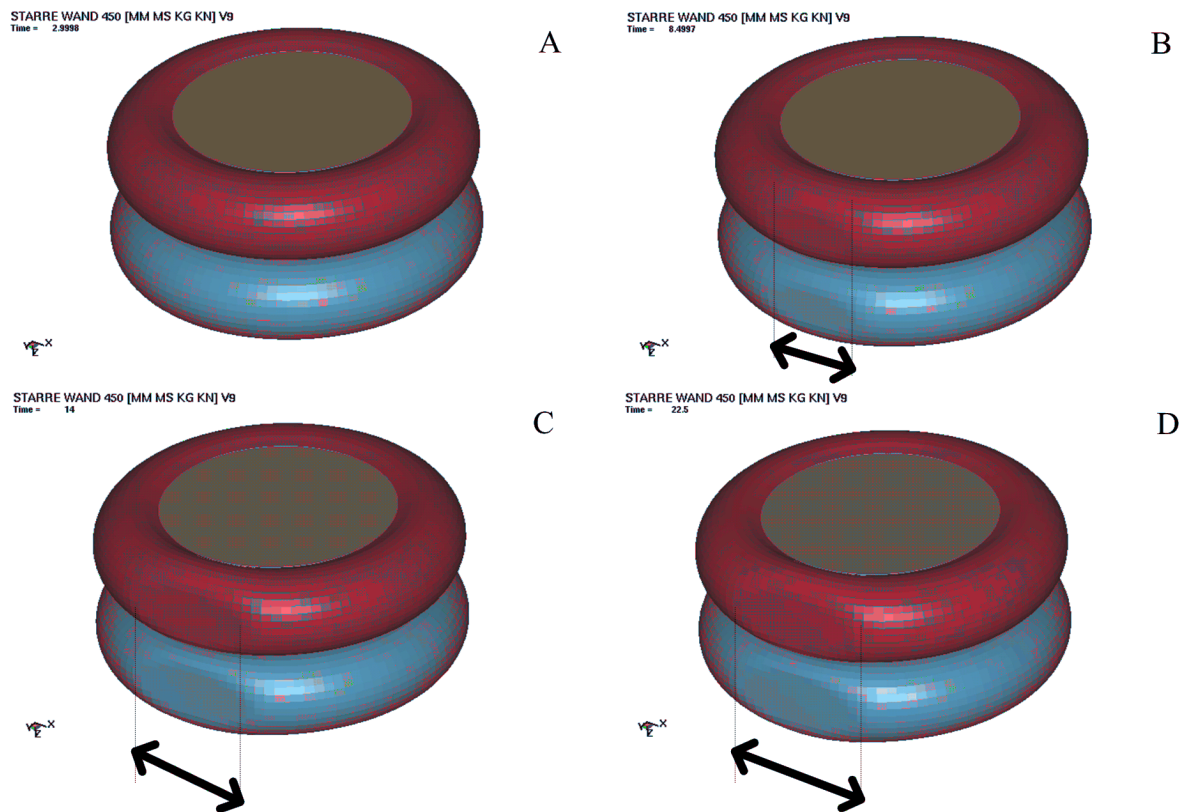


Bild 3.43: Bildserie Stoßkörper 3D, Blickrichtung gegen die Kontaktfläche der Reifen

Bild 3.43 stellt die sich während des Stoßes verändernden Anprallflächen der Reifen dar:

- A: Die rund aufgeblasenen Reifen vor dem Anprall.
- B: Der Stoßkörper tritt mit der Glastafel in Kontakt. Der Reifen wird plattgedrückt.
- C - D: Bis das Pendel vollständig verzögert ist, vergrößert sich die Anprallfläche. Infolge der Volumenreduzierung steigt der Reifeninnendruck.

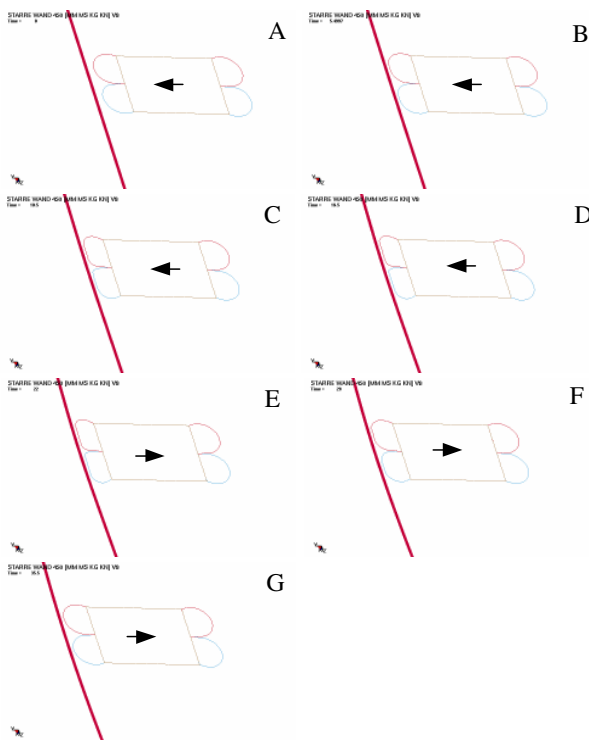


Bild 3.44: Bildserie Stoßkörper 2D

Bild 3.44 zeigt den Stoßkörper während des Stoßes im Schnitt:

A: Vor dem Stoß.

B-D: Diese Bilder stellen die Kompressionsphase dar. Beim Zusammendrücken der Reifen wird elastische Energie gespeichert.

E - F: Die gespeicherte Energie wird in der Dekompressionsphase wieder frei. Die Stoßpartner entfernen sich voneinander. Der Reifeninnendruck zwingt die Reifen wieder in die Ausgangsform.

G: Der Stoßkörper hat sich vollständig von der Glastafel gelöst und schwingt zurück. Die Verformung der Glastafel ist noch sichtbar.

3.7.4 Kalibrierung des FE - Prüfkörper - Modells

Der Verschiebungsweg eines Punktes auf der Glastafel lässt sich während des Stoßes messen und den Simulationsergebnissen gegenüberstellen. Experimentelle Untersuchungen von Einscheiben-Sicherheitsglastafeln und Mehrscheiben-Isolierglastafeln wurden in [Rü 99] und [Rü 01] durchgeführt. Leider sind der Aufbau und die Geometrien der Prüfraumen unzureichend dokumentiert und können im Modell nicht mehr exakt nachgebildet werden. Die gemessenen Verschiebungen der Glastafel beinhalten deren Durchbiegung, die Nachgiebigkeit der Unterkonstruktion und Anteile aus Nachgiebigkeiten oder reduzierende Effekte infolge einer Teileinspannung zwischen den elastischen Trennstreifen der Linienlagerung.

Zunächst ist die Frage zu klären, ob diese Anteile relevant werden. Als Basis für die Entscheidung, ob die FE – Modellierung geeignet ist und ob es gerechtfertigt ist, gewisse Vereinfachungen zu treffen, werden diese Anteile in dieser Arbeit getrennt ausgewiesen und bewertet.

Hinweise zu Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsergebnissen finden sich in [Br 04b], Bild 6. Für Bemessungen im Bauwesen ist die dort vorhandene Übereinstimmung ausreichend. Vergleicht man die Weg – Zeit – Verläufe exakt, so folgt die stoßabgewandte Seite der MSI-Verglasung, mit der flächigen Einwirkung des Gasvolumens, den Messwerten aus [Rü 99]. Für die stoßzugewandte Glastafel werden jedoch 3 mm zu große Verformungen berechnet. Die Untersuchungen erfolgten unter Ansatz von Werkstoffkennwerten nach Tabelle 3.

In den rechnerischen Simulationen zu den experimentellen Untersuchungen des Pendelschla-
ges auf eine zweiseitig gelagerten 8 mm dicken Glastafel [Bu 04b] (siehe Bild 3.45) wurden
ebenfalls zu große Verformungen der Glastafel berechnet. Da das Verformungsverhalten des
Glases (Elastizitätsmodul) anhand statischer Druckversuche kalibriert war, wurde ein Einfluss
der elastischen Neoprenrandlager vermutet. Das FE-Modell für die Berechnungen ist in Bild
3.46 dargestellt.

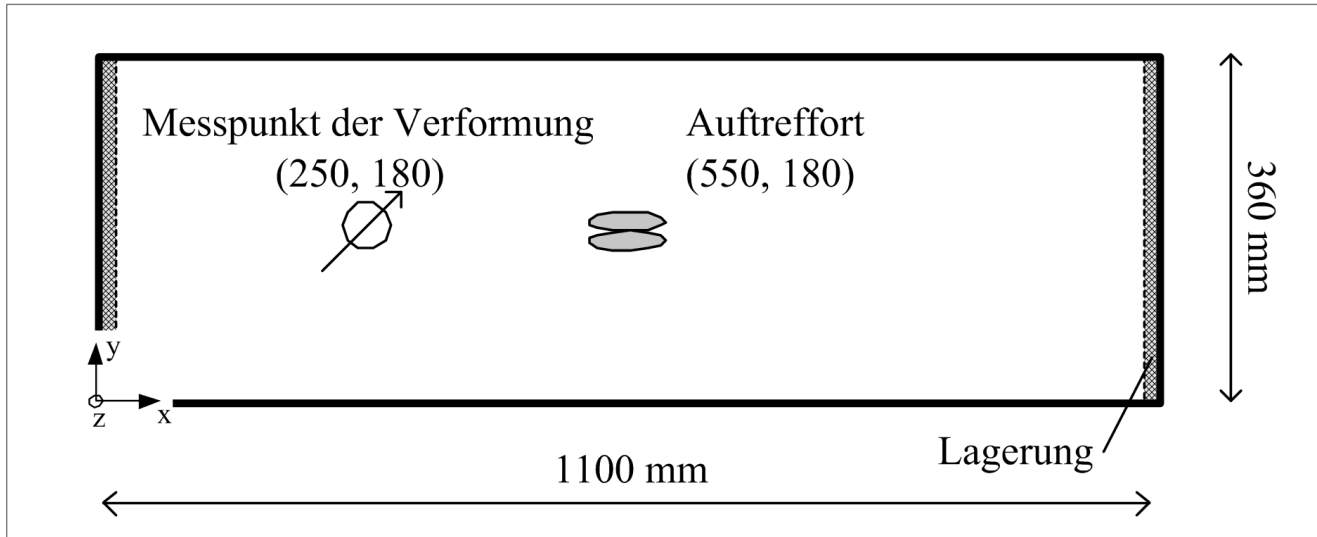


Bild 3.45: Versuchsaufbau, Glastafel 360 mm x 1100 mm zweiseitig liniengelagert

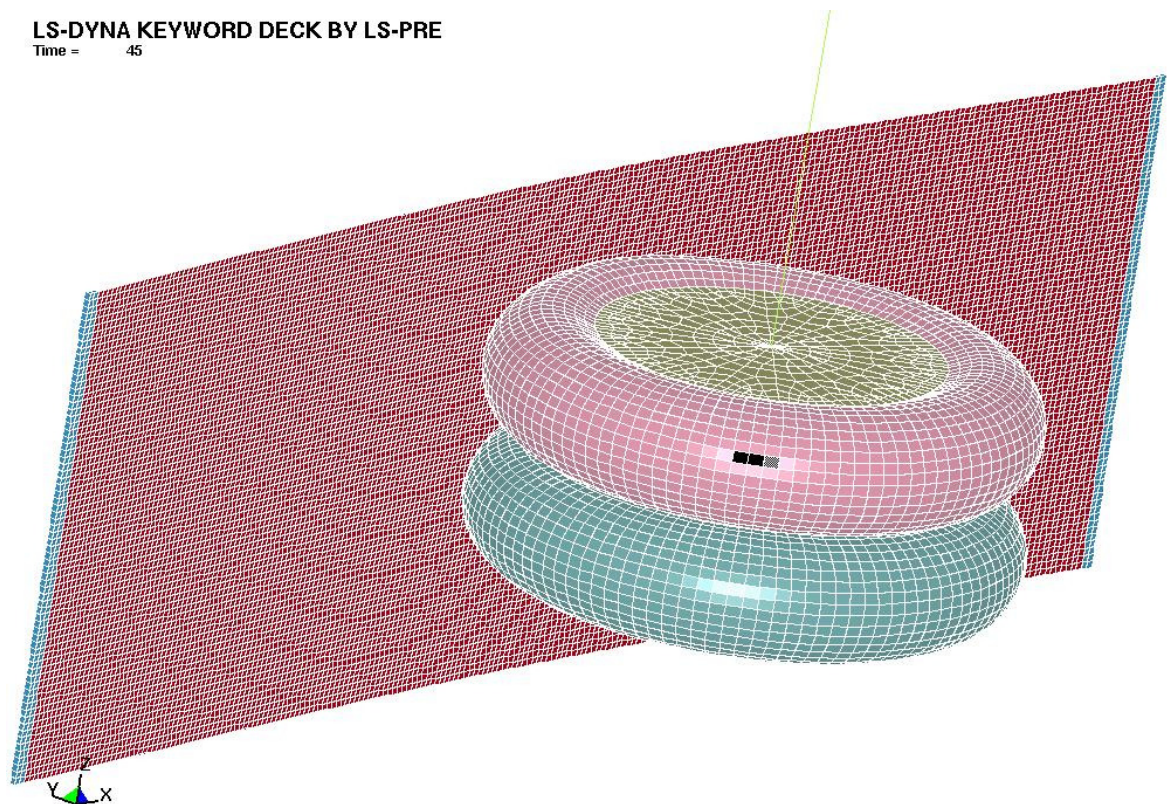


Bild 3.46: FE-Modell des Programms LS-DYNA

Ziel der Untersuchungen ist es abzuschätzen, ob eine Teileinspannung an den Auflagern die Verschiebung des Tafelmittelpunktes so weit reduzieren kann, dass die Berechnungsergebnisse mit den Messwerten korrelieren. Steigt die Drehfedersteifigkeit im Auflager, verringern sich die berechneten Tafelverformungen. Die Berechnungsergebnisse stimmten mit den Messwerten jedoch erst überein, nachdem ein unerwartet großer Elastizitätsmodul der elastischen Lagerschichten ($> 10.000 \text{ N/mm}^2$) angenommen wurde. Zunächst wurde überprüft ob sich das Neoprenrandlager bei Belastung so stark versteifen kann. Eine Parameteridentifikation für das Neoprenrandlager aus den Ergebnissen von Zugversuchen [Br 04] und anschließenden Kontrollberechnungen mit nichtlinearen Materialgesetzen war nicht zielführend. Es konnte nicht nachgewiesen werden, dass sich das Elastomer im Lager in der erforderlichen Größenordnung versteift, damit die Berechnungen den gemessenen Effekt beschreiben können.

Für ein detailliertes und kalibriertes FE – Modell, wird eine gute Übereinstimmung zwischen den Berechnungsergebnissen und den gemessenen Verschiebungen erwartet. Nur dann ist es für rechnerische Dimensionierungen verwertbar. Die lokalen Verformungen setzen sich aus Nachgiebigkeiten der Unterkonstruktion, der Zwischenschichten sowie Verformungen der Glastafeln zusammen. Bild 3.61 zeigt bei Mehrscheibenisolierverglasung eine Abweichung der berechneten zu den gemessenen Verschiebungen für die innere, stoßzugewandte Glastafel. Leider waren die Randbedingungen im Versuchsbericht nicht detailliert genug aufgenommen, um aus der Gesamtverschiebung die Komponenten der Verschiebung der Unterkonstruktion von der Glastafelverformung zu trennen. So kann die Abweichung nicht differenziert bewertet werden. Es stellt sich die Frage, ob das gewählte FE – Modell das Werkstoffverhalten bei Stoßbelastung oder den physikalischen Hintergrund ungenügend beschreibt. Mit LS-DYNA werden im Automobilbau Anprallvorgänge in der Kurzzeitdynamik (Crashtest) simuliert. Bei diesen Berechnungen prallen Stoßkörper (Autos) mit höheren Geschwindigkeit und komplexeren Steifigkeitsverhalten gegen Hindernisse als beim Pendelschlagversuch im Glasbau. Aufgrund der guten Übereinstimmung von Simulationsergebnissen mit den realen Versuchen hat sich LS-DYNA als Werkzeug zur Crash-Simulation bei vielen Automobilherstellern etabliert. Es ist zu erwarten, dass der vergleichsweise „einfachere“ Stoßvorgang des Pendelschlagversuchs damit realitätsnah abgebildet werden kann.

Bei der systematischen Suche nach Gründen fanden sich in der Literatur weitere Abweichungen zwischen Berechnungs- und Versuchsergebnissen bei Pendelschlagversuchen. So z. B. in der Gegenüberstellung der Dehnungen „längs“ und „quer“ aus [Bo 00], Bild 4.6. Es fällt auf, dass die gemessenen Dehnungen „quer“ gegenüber den berechneten Dehnungen mit etwa 10 % geringer sind. Ein weiteres Beispiel sind die Tafelverformungen bei MSI in den Simulationen von [Br 04b]. Die Verschiebungen der inneren, stoßzugewandten Glastafel stimmen in der Simulation mit den Messdaten von [Rü 02a] überein. Die Verschiebungen der äußeren Glastafel waren in den Berechnungen immer größer. In diesem Versuch beeinflusst die Steifigkeit des Prüfrahmens den global gemessenen Weg. Im Messwert des Weges sind die hori-

zontale translatorische Komponente der Prüfrahmenverschiebung und die Verformung der Glastafel überlagert. Auf das Messergebnis haben die Rahmensteifigkeit, Art der Linienlagerung und die Rahmenauflagerpunkte Einfluss. Der Versuchsaufbau ist nicht hinreichend genau beschrieben um die Höhe der Einflüsse zu quantifizieren, so wurde in einer Parameterstudie für die vorliegende Arbeit die Anbindung der Diagonalen vertikal so verschoben, bis der berechnete Zeit – Weg –Verlauf der inneren Glastafel mit den Messwerten übereinstimmte. Das Ergebnis war, dass das so kalibrierte FE – Modell die Verformungen der äußeren Glastafel geringfügig überschätzt (siehe Bild 3.61, Kurve a und d) hat. Zweifelsfreie Aussagen über die Gründe waren ausgehend von den FE – Berechnungsergebnissen und den von Rück in [Rü 02a] dokumentierten und Messdaten Prüfrahmensteifigkeiten nicht mehr möglich. Der Prüfrahmen war mit Versteifungsprofilen unbekannter Geometrie verstärkt.

Bei vielen Baustoffen, Elastomer, Beton usw. ist ein Zusammenhang zwischen Belastungsgeschwindigkeit und Steifigkeitsverhalten bekannt. Es ist die Frage zu klären, ob Glas ebenfalls Werkstoffeigenschaften besitzt, die von der Beanspruchungsart und von der Beanspruchungsgeschwindigkeit abhängen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Höhe des Elastizitätsmoduls von Glas für den Lastfall „Anprall des Stoßkörpers nach DIN EN 12600“ abgeschätzt. Dazu dienten die Messdaten von Pendelschlagversuchen gegen eine zweiseitig ideal gelenkig gelagerte rechteckige Glastafel mit den Abmessungen 360 mm x 1100 mm x 8 mm (Bild 3.16, Versuchsaufbau aus [Bu 04a]). Diese war an Schnüren hängend gehalten und lag an einem starren Stahlrahmen an. Die Größe und der Rahmen waren analog, so konnte das FE – Modell der Glastafel ohne Störeinflüsse aus Linienlager oder Prüfrahmen validiert werden. Der Stoßkörper war über ein Seil mit einem Portalkran verbunden und wurde auf die Fallhöhe 100 mm gezogen (siehe Bild 3.15). Mit einem Seitenschneider wurde die Halteschnur durchtrennt und der Stoß ausgelöst. Die Ergebnisse aus vier Messungen sind in Bild 3.47 (Versuch V1 bis Versuch V4 [Bu 04a]) dargestellt.

Die Erkenntnisse aus den FE-Berechnungen dieses Versuches mit LS-DYNA werden nachfolgend zusammengefasst:

- Wird bei der FE-Simulation keine Dämpfung verwendet, oszillieren die Berechnungsergebnisse über der Hauptverschiebung. In LS-DYNA besteht die Möglichkeit die Werkstoffdämpfung zu berücksichtigen. Dies reduziert die Oberschwingungen, zudem verlängert die Dämpfung die berechnete Stoßphase.
- In der Simulation des Anpralls mit einem Elastizitätsmodul von Glas unter quasistatischer Einwirkung $E_{\text{stat}} = 70.000 \text{ N/mm}^2$, werden die Verformungen mit dem Faktor 1,5 zu groß berechnet.
- Die Simulationsergebnisse dieses Pendelschlages mit den Werkstoffparametern für Glas mit 1 % massenabhängiger Dämpfung und einem dynamischen Elastizitätsmodul $E_{\text{dyn}} = 100.000 \text{ N/mm}^2$ ergaben eine hinreichende Übereinstimmung. Mit diesen Annahmen wird der in Bild 3.47 (LS-DYNA $E_{\text{dyn}} 100$) dargestellte Weg – Zeit – Verlauf berechnet.

- Ein linear-elastischer Ansatz zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens der Lagerelastomere ist für baupraktische Anwendungen ausreichend genau.

Das FE – Modell beschreibt die Messdaten von vier Versuchen von Bucak [Bu 04a] in guter Näherung (Bild 3.47). Die Dämpfungsanteile verzehren einen Teil der einwirkenden Energie. Entsprechende Berechnungen sind zeitintensiv. Da die maximale Verformung und damit auch die maximale Beanspruchung in der Glastafel ohne Dämpfung abgeschätzt werden können, kann der Dämpfungsanteil für die baupraktische Bemessung von absturzhemmenden Glastafeln vernachlässigt werden.

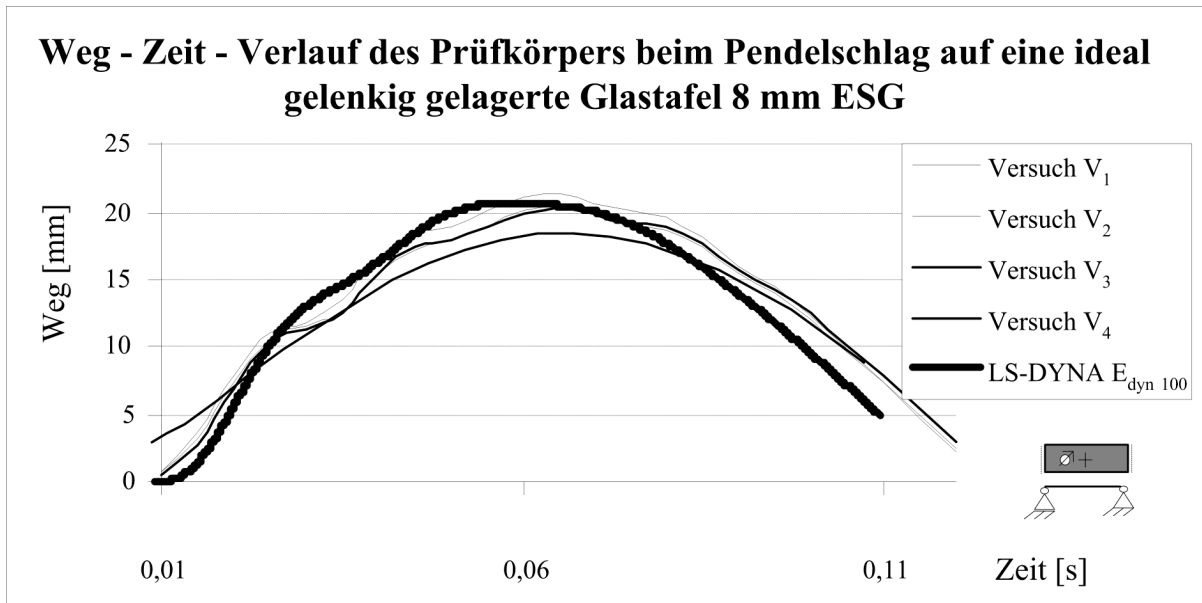


Bild 3.47: Gegenüberstellung: Versuch - LS-DYNA Ergebnisse (Messdaten aus [Bu 04a], $h = 100$ mm)

3.7.5 Validierung des FE - Prüfkörper - Modells

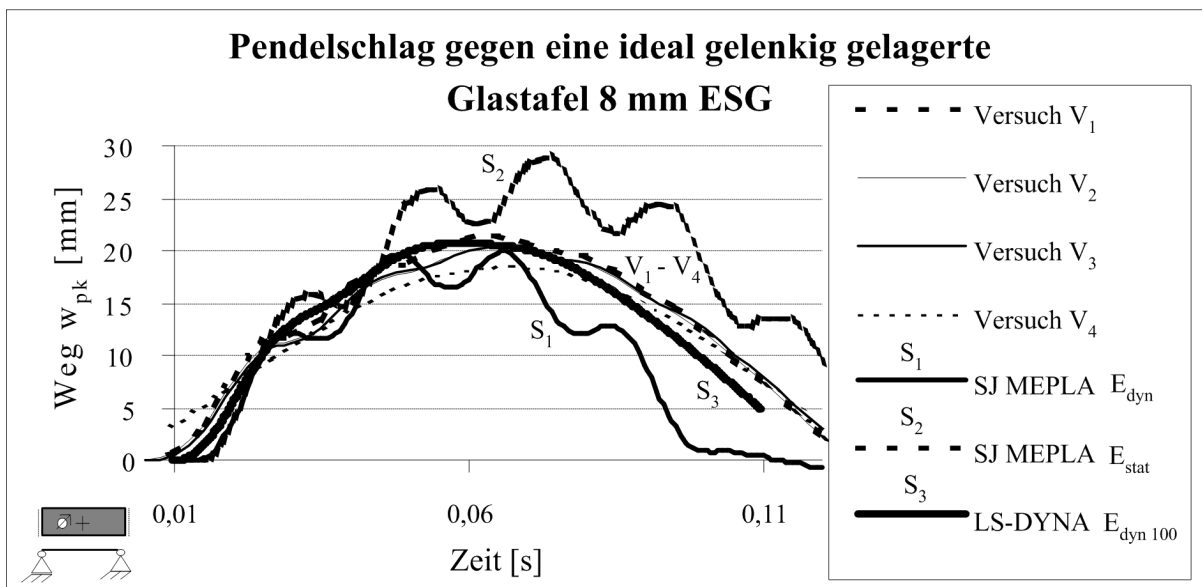


Bild 3.48: Gegenüberstellung: Versuch – Simulationen mit diversen Werkstoffannahmen, $h = 100$ mm

Die gemessenen Wege aus vier Pendelschlagversuchen aus [Bu 04a] mit einer Fallhöhe $h = 100$ mm sind in Bild 3.48 mit Versuch V_1 bis Versuch V_4 dargestellt. Der Mittelwert der gemessenen Wege aus vier Messungen beträgt 20,22 mm.

Das Programm SJ MEPLA berücksichtigt bei der Simulation (Bild 3.48 S_1 und S_2) keine Dämpfungseffekte, so dürfen eventuell errechnete Oberschwingungen nicht als ungenügende Übereinstimmung mit Messergebnissen interpretiert werden. Die Berechnungsergebnisse mehrerer Simulationen des Pendelschlagversuchs sind den Messdaten in Bild 3.48 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei Ansatz des statischen Elastizitätsmoduls die Verschiebungen (SJ MEPLA E_{stat}) überschätzt werden, mit dem dynamischen Elastizitätsmodul (SJ MEPLA E_{dyn}) werden die Maximalverschiebungen mit dem Versuch übereinstimmend errechnet. Damit bestätigen sich die Rechenansätze des Programms.

In einem weiteren Pendelschlagversuch war die gleiche Glastafel zwischen Gummiprofilen liniengelagert. Die Randeinspannung zwischen dem Prüfraumen und den Klemmleisten mit eingelegten Neopren Trennstreifen (Dicke 4 mm) wird in der Berechnung mit Volumenelementen simuliert. Sie sind zug- und druckfest mit dem Glas verbunden. Angenommen wurden linear elastische Werkstoffeigenschaften bei einem Elastizitätsmodul von 4 N/mm^2 . Der Glas-einstand betrug jeweils 15 mm. Ein gemessener Zeit – Weg – Verlauf für eine Fallhöhe von 180 mm aus [Bu 04] sind in Bild 3.49 (A) dargestellt.

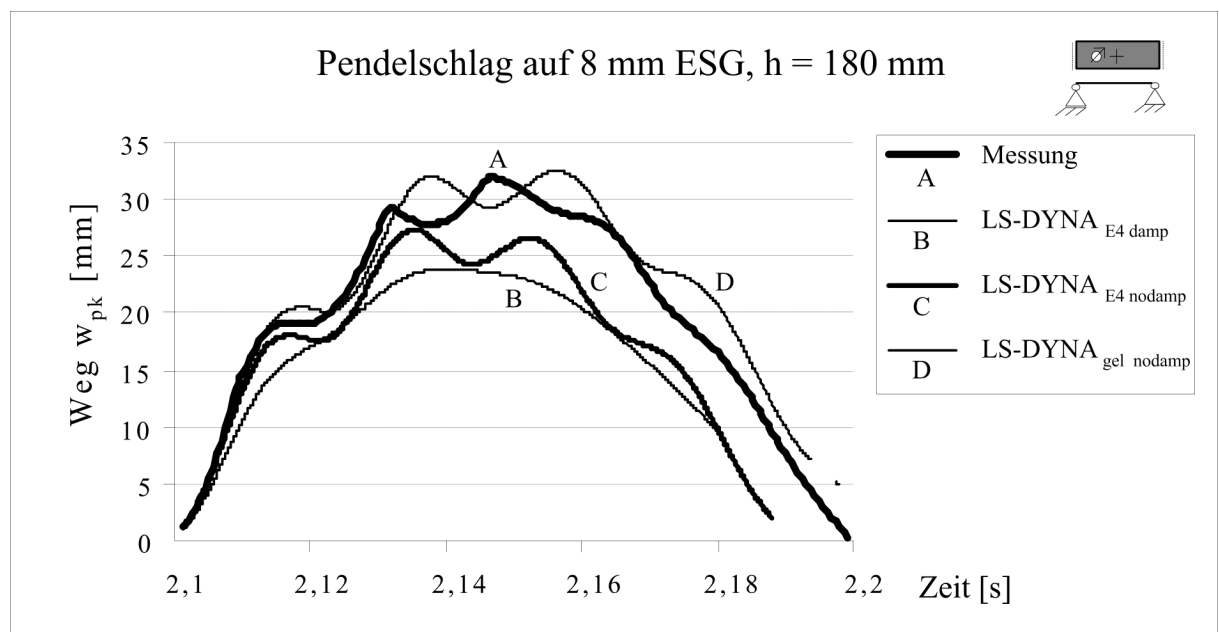


Bild 3.49: Vergleich Messung Berechnung $8 \times 360 \times 1.100$, [Bu 04] Fallhöhe $h = 180$ mm

Gemessen wurde die Maximalverschiebung mit 31,95 mm. Über der Grundschiwingung werden nur geringe Oberschwingungen gemessen (Kurve A in Bild 3.49). In den Simulationen (z. B. Bild 3.48 S_3) wurde als Wert des dynamischen Elastizitätsmoduls von 100.000 N/mm^2 verwendet. Mit einer massenproportionalen Dämpfung im Glas wird der Verformungsverlauf B berechnet. In einer weiteren Simulation (Kurve C) wurde auf die Dämpfung verzichtet. Das Lager mit elastischem Volumen hat ebenfalls Einfluss auf das Verformungsverhalten der

schwingenden Glastafel. Den Grenzfall stellt die ideal gelenkige Linienlagerung dar (Kurve D in Bild 3.49). Aufgrund der geringen Abweichungen wird für die weiteren Berechnungen das Modell mit der gelenkigen Lagerung gewählt. Es bildet die maximalen Belastungen in der Glastafel ab und benötigt dabei die geringste Rechenzeit.

3.8 Gegenüberstellung der Ergebnisse von SJ MEPLA und LS-DYNA

3.8.1 Stoßkörpermodellierung

Die Modellierung des Stoßkörpers wird zwischen LS-DYNA und SJ MEPLA für unterschiedliche Fallhöhen beim Stoß gegen die starre Wand verglichen. Es ergeben sich die in Bild 3.50 dargestellten Stoßkörperbeschleunigungen. Die Fallhöhen 450 mm und 900 mm des Stoßkörpers wurden für die Simulationen und die Beschriftung in Bild 3.50 zu Grunde gelegt. Mit linearen Werkstoffeigenschaften des Reifenmantels verhält sich die FE – Modellierung mit LS-DYNA minimal steifer, die Stoßphase ist etwas kürzer und weist einen größeren Maximalwert gegenüber den Berechnungen mit SJ MEPLA auf.

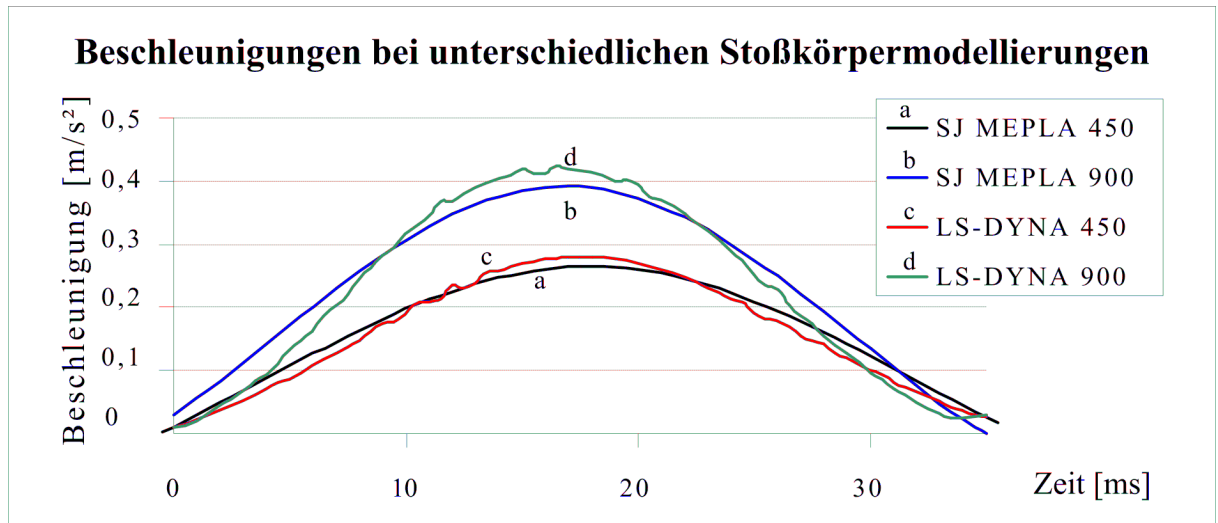


Bild 3.50: Vergleich validierter Pendelmodelle; SJ MEPLA und LS-DYNA

Tabelle 3.17: Auftreffgeschwindigkeiten und Kraftstoß, TRAV – FE – Modell

Fallhöhe [mm]	Auftreffge- schwindigkeiten, Energieerhaltung [m/s] (Sollwerte)	Simulation mit LS-DYNA		Simulation mit SJ MEPLA	
		Kraftstoß integriert [mm/ms]	Auftreffge- schwindigkeit zurückgerech- net [m/s]	Kraftstoß integriert [mm/ms]	Auftreffge- schwindigkeit zurückge- rechnet [m/s]
450	2,971	5.945	2,972 ²²	5.943	2,971 ²²
700	3,706	7.453	3,726 ²²	7.413	3,706 ²²
900	4,202	8.523	4,202 ²²	8.523	4,202 ²²

Greift man die Beschleunigungs – Zeit – Wertepaare aus diesen Graphen ab und integriert über dem Kraftstoß nach (3.16), ergeben sich die in Tabelle 3.17 zurückgerechneten Auftreffgeschwindigkeiten des Stoßkörpers. Beide Modellierungen übertragen die nach TRAV geforderten Energieanteile und sind damit für die Nachweise absturzhemmender Glastafeln geeignet.

²² Die dargestellte Genauigkeit mit mehr als einer Nachkommastelle ist für die Baupraxis nicht relevant. In der vorliegenden Arbeit ist damit die Übereinstimmung der Modellierungen von SJ MEPLA und LS-DYNA mit der Realität belegt.

3.8.2 Pendelschlagversuche auf eine monolithische Glastafel

3.8.2.1 Allseitig gelagerte Glastafel

ESG 8 MITTE [MM MS KG KN] ALS SHELLS
Time = 0



Bild 3.51: FE-Modell der Glastafel und des Stoßkörpers

Für die folgenden Betrachtungen werden die rechteckigen Glastafeln mit den Abmessungen von 1.050 mm x 2.056 mm ($b \times h_G$) ausgewählt, die in [Rü 99a] und [Rü 02a], Bild 4-7, experimentell untersucht wurden. Die rechteckigen Glastafeln sind vierseitig zwischen Gummidichtungen liniengelagert. Als Unterkonstruktion dient ein Stahlrahmen aus U-100 Profilen. Die Pressleisten bestehen aus U-50 Profilen, die gegeneinander verschraubt sind. Der

Prüfrahmen ist mit zwei Diagonalen abgestützt. Die Nennglasdicke beträgt 8 mm (gemessener Wert 7,75 mm). Gegen die Glastafel wird ein Stoß mit einem Stoßkörpers mit 450 mm Fallhöhe ausgeführt. Die Berechnungsergebnisse mit SJ MEPLA und LS-DYNA sind in Tabelle 3.18 und Bild 3.52 zusammengestellt. In Bild 3.53 ist eine Trendlinie des Zeit - Weg - Verlaufs der Glastafelmitte aufgezeigt. Der Einfluss der Lagerung ist in Bild 3.54 dargestellt. Gegenüber der ideal gelenkigen Lagerung (Bild 3.54, Kurven a und b) ist zusätzlich der Einfluss eines elastischen Lagers durch Kurve c dargestellt. In der Simulation mit LS-DYNA ist die Glastafel zwischen 10 mm breite und 4 mm dicke elastischen Zwischenschichten mit einem Elastizitätsmodul von 20 N/mm² gelagert. Die maximalen Verschiebungen der Glastafelmitte sind infolge der nachgiebigen Randlager etwas kleiner.

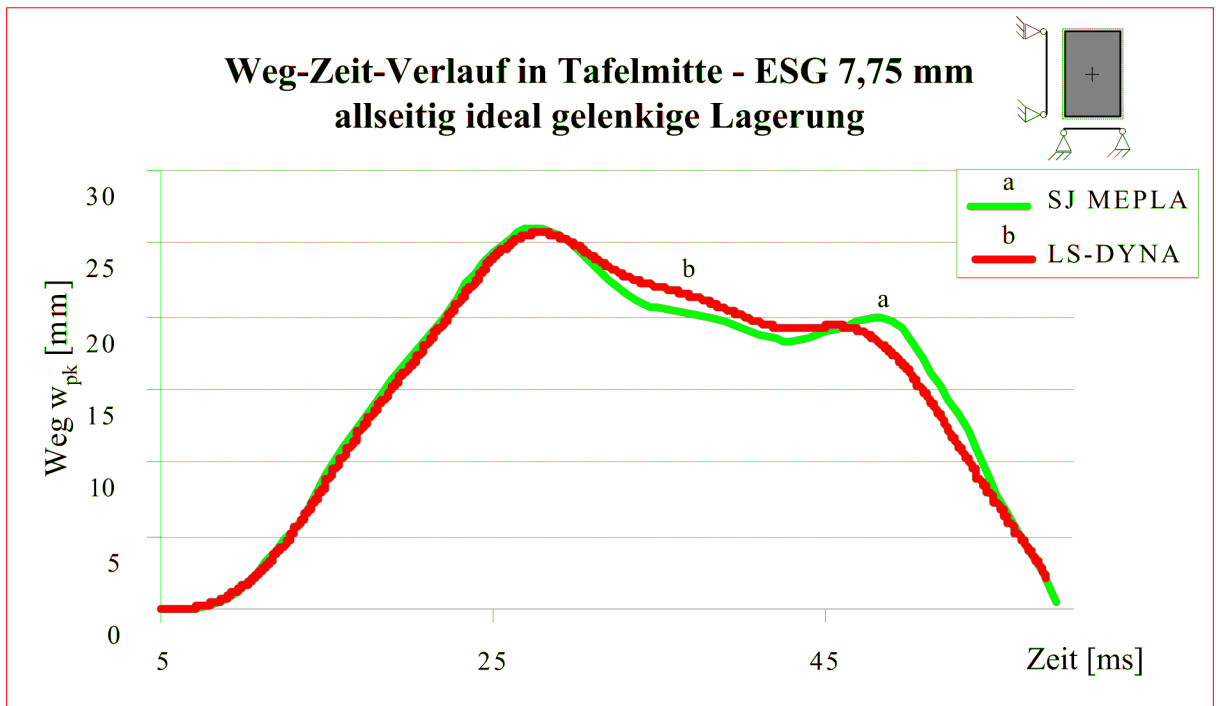


Bild 3.52: Pendelschlag auf ESG mit SJ MEPLA und LS-DYNA

Tabelle 3.18: Stoßkörperkräfte beim Stoß gegen ESG $t = 7,75 \text{ mm}$

Programm	$F_{\text{Pstoß}}$ [kN]
SJ MEPLA	10,4
LS-DYNA	10,6

Schon ohne allseitige Halterungen bildet sich ein versteifender Zugring in der ausgelenkten Glastafel, der nach Theorie 3. Ordnung rechnerisch bewertet werden kann. Werden die Glaskanten zusätzlich gegenüber Verschiebungen in x-,

y-, und z-Richtung gehalten, wirken in dieser Simulation zusätzlich Membranspannungen in der Glastafel (Zugband). Geringere Verformungen werden berechnet (Bild 3.54, Kurve d). Dies entspricht allerdings einem statischen System der Lagerung das übliche Pressleistensysteme im konstruktiven Glasbau unrealistisch abbildet. Die Reibung zwischen Glas und elastischen Trennstreifen wird nicht ausreichen, um die Membrankräfte auszuleiten.

In DIN EN 12600 ist als Aufhängeseil des Stoßkörpers ein Drahtseil mit 5 mm Durchmesser beschrieben. Prüfinstitute verwenden beliebig andere Anschlagmittel, teilweise sogar Metallstangen. Aufgrund der Trägheit kann der Stoßkörper bei einem biegeweichen Anschlagmittel leicht schräg gegen den Prüfkörper prallen. In der nachfolgenden Parameterstudie wird ein ideal ausgerichteter Stoßkörper, das heißt beide Reifen treffen gleichzeitig auf die Glastafel, mit einem um 10 Grad geneigten verglichen. In Bild 3.55 sind diese Berechnungsergebnisse dargestellt. Mit den Lagerbedingungen üblicher Pressleistensysteme (Bild 3.55 Kurve a und c), erzeugt ein ideal ausgerichteter Stoßkörper eine um 4,6 % größere Verschiebung der Tafelmitte. Auch bei dem steiferen Prüfkörper mit zusätzlichen festen Lagern in Scheibenebene wird für den ideal ausgerichteter Stoßkörper eine um 4,7 % größere Verschiebung der

Tafelmitte berechnet (Bild 3.55 Kurve b und d). Damit ist der Einfluss der untersuchten Stoßkörperneigung bis 10 % für baupraktische Anwendungen nicht relevant.

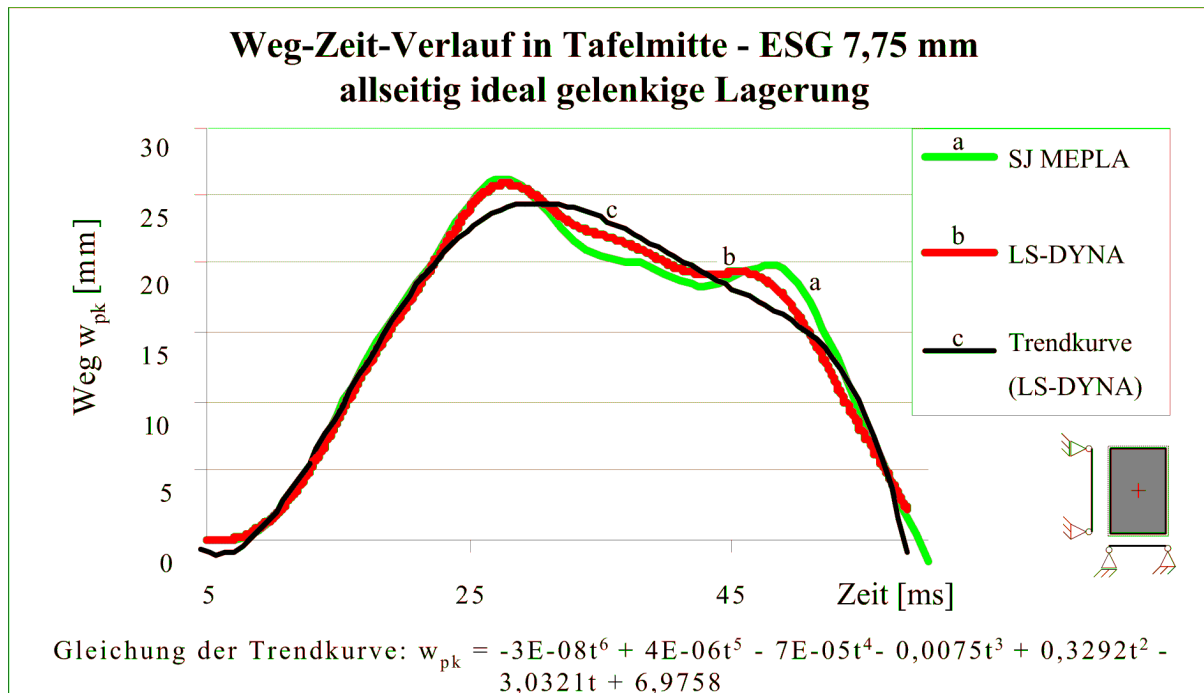


Bild 3.53: Benchmark für eine allseitig gelagerte Glastafel 7,75 mm x 1.050 mm x 2.056 mm, Stoßkörperanprall $h = 450$ mm

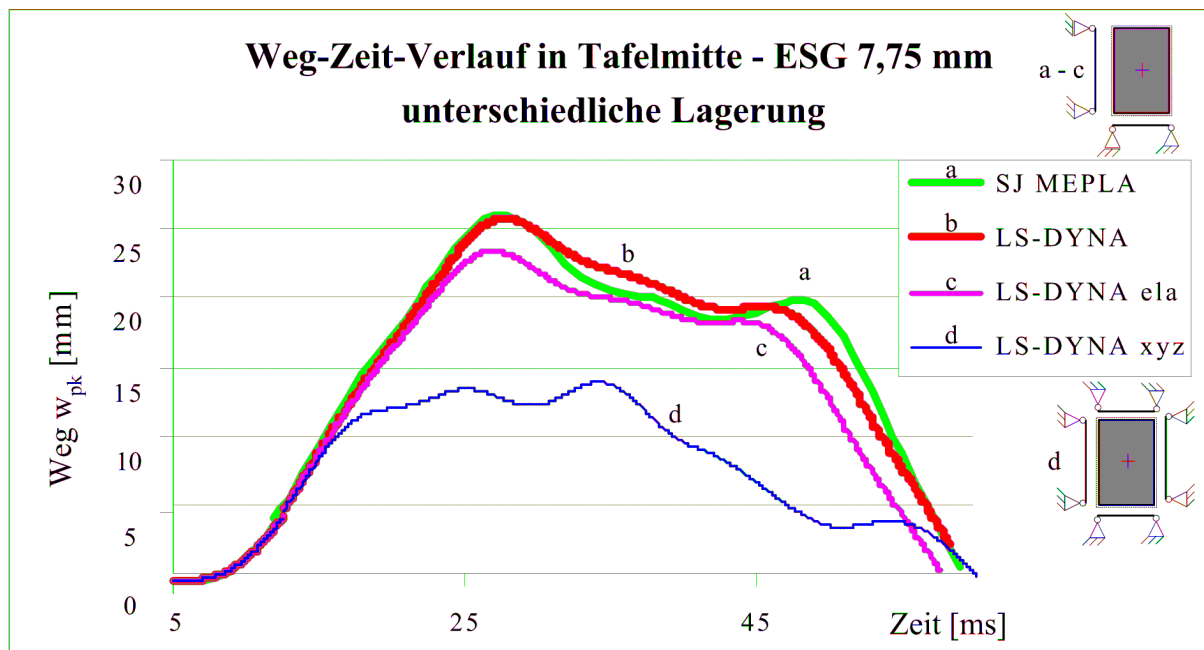


Bild 3.54: Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen bei Einscheiben-Sicherheitsglas

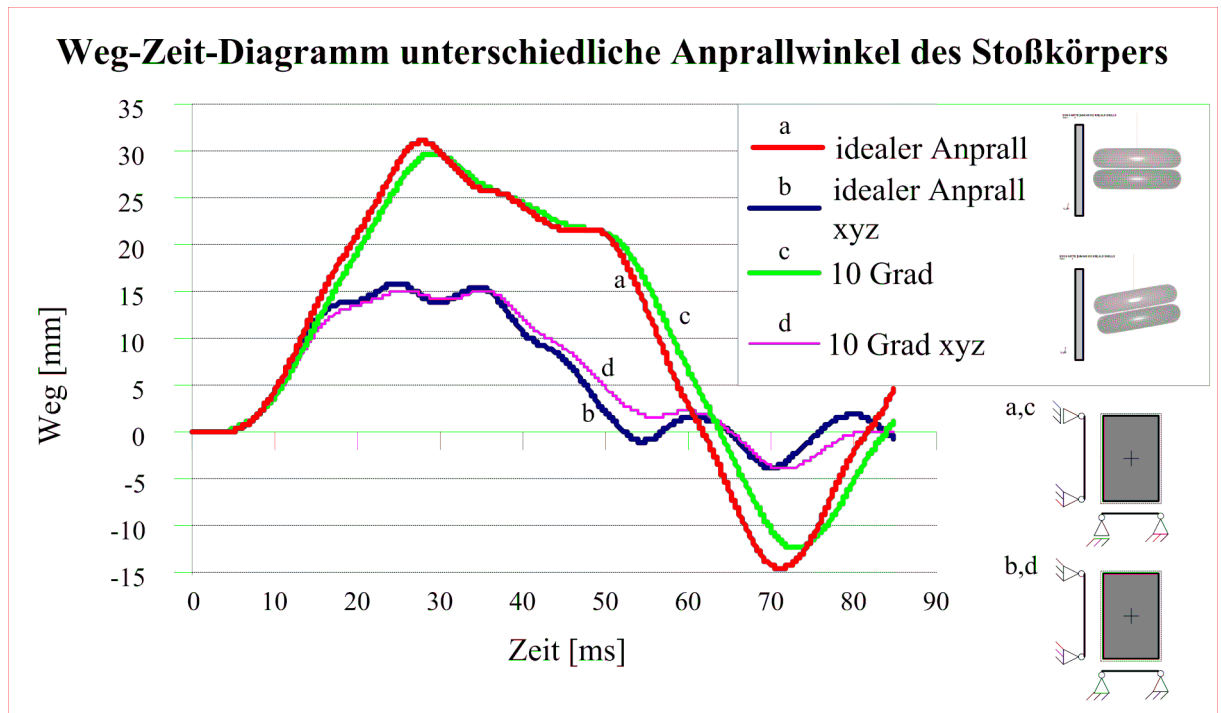


Bild 3.55: Einfluss unterschiedlicher Anprallwinkel des Stoßkörpers

3.8.2.2 Zweiseitig gelagerte Glastafel

Der in [Bu 04a] gemessene Zeit-Weg-Verlauf beim Pendelschlagversuch gegen eine 15 mm dicke, zweiseitig gelagerte Glastafel aus ESG mit den Abmessungen gemäß Bild 3.56 wurde hier ausgewertet und Berechnungsergebnissen mit unterschiedlicher Lagerung gegenübergestellt. Die Auflagerbreiten wurden analog Kapitel 3.5.4 mit 10 mm x 360 mm x 4 mm (B x L x D) gewählt. Untersucht wurden verschiedene Lagerungen mit dem Ziel, zu bewerten, welcher Detaillierungsgrad der Auflager im FE – Modell erforderlich ist:

- ideal gelenkige Lagerung
- elastisches Linienlager mit einem E – Modul von 50 N/mm²
- elastisches Linienlager mit einem E – Modul von 100 N/mm²

Das Schwingungsverhalten der Glastafel mit Dämpfung ist in Bild 3.57 zu sehen. Die Stoßphase vom Auftreffen des Stoßkörpers bis ca. 70 ms nach dem Anprall ruft die größten Beanspruchungen in der Glastafel hervor. Die Messwerte aus [Bu 04a] sind in Bild 3.58 den Berechnungsergebnissen mit gelenkiger Lagerung (LS-DYNA gelenkig), einem einseitig fest verbundenen Volumen mit der Dicke der Zwischenschicht (4 mm) und einem Elastizitätsmodul von 50 N/mm² (LS-DYNA E 50) bzw. 100 N/mm² (LS-DYNA E 100) gegenübergestellt. Die Pendelfallhöhe wurde mit 200 mm entsprechend den Versuchen vorgegeben.

Für die baupraktische Bemessung ist die ideal gelenkige Lagerung eine ausreichend genaue Annäherung an die Wirklichkeit.

Zur Validierung des Schwingungsverhaltens der Glastafel im FE – Modell wurde zur einfachen Anwendung eine geeignete Trendlinie in Bild 3.59 berechnet.

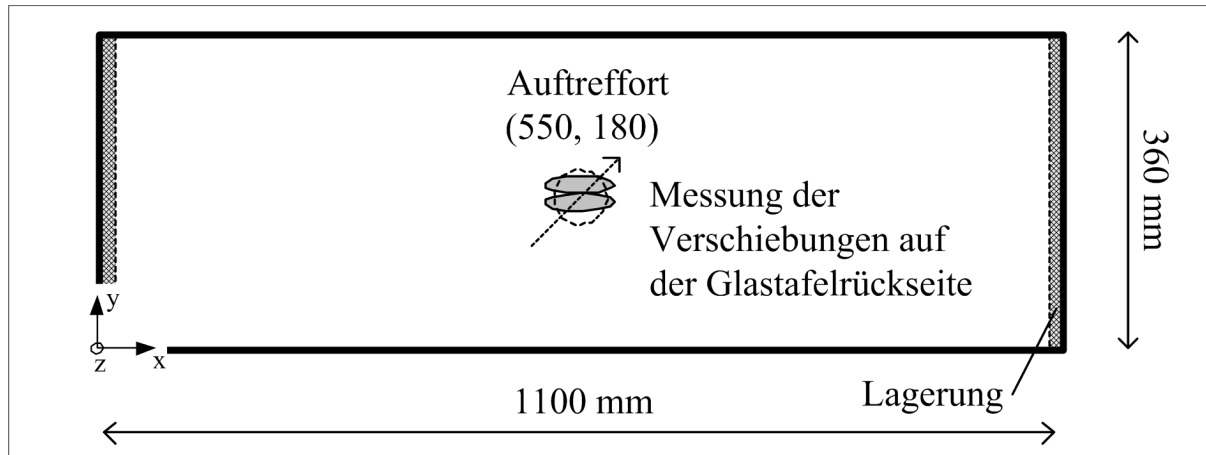


Bild 3.56: Geometrie der Glastafel sowie Lage des Anschlag- und Messpunktes

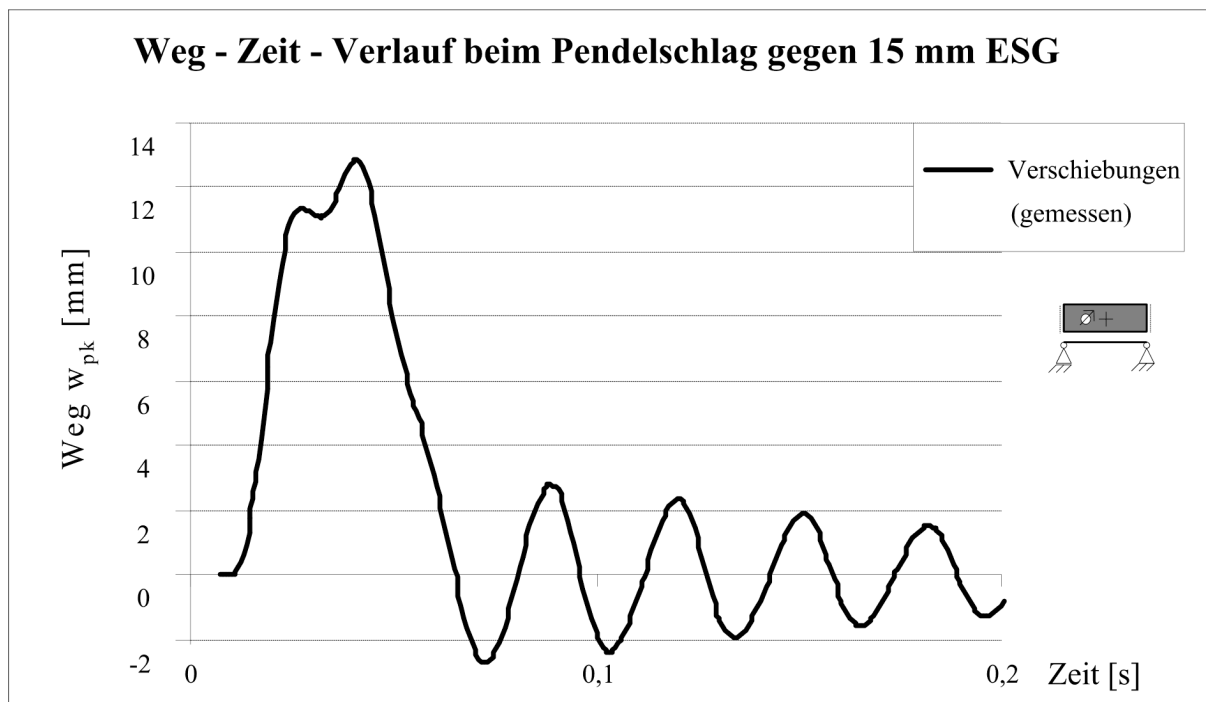


Bild 3.57: Ausschwingverhalten der Glastafel aus 15 mm ESG, $h = 200$ mm

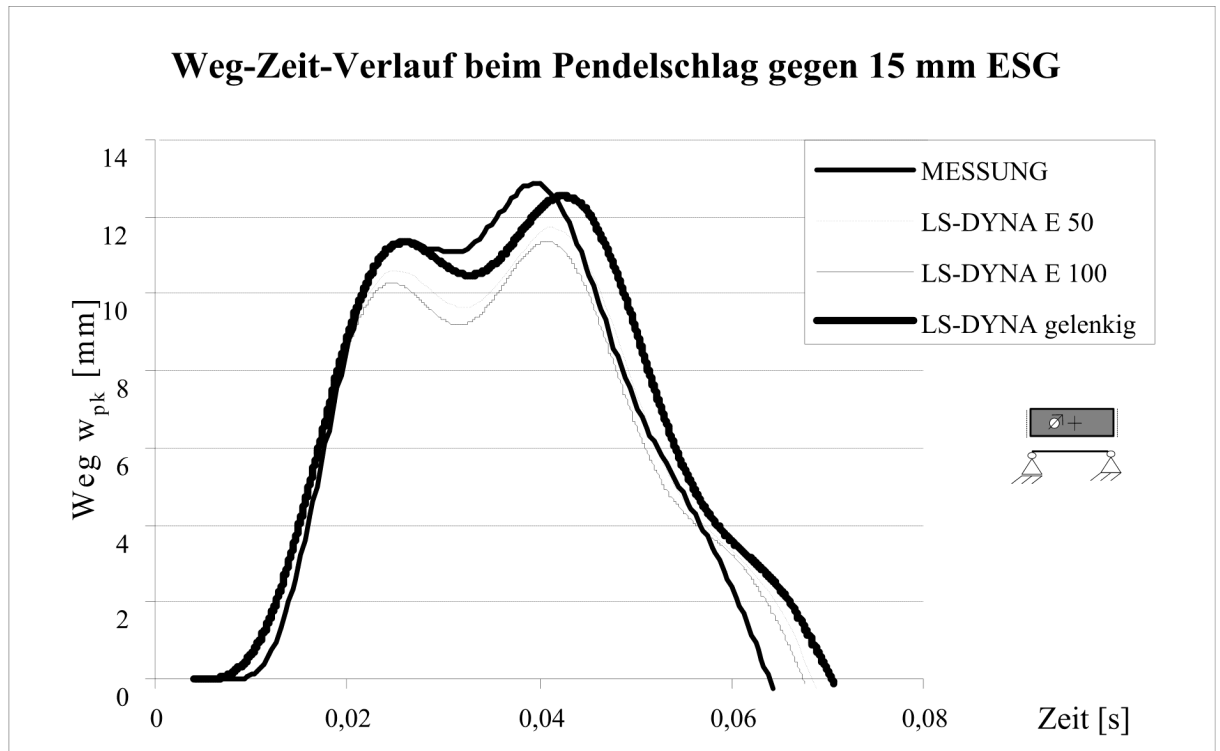


Bild 3.58: Auszug der Glastafelverformung (Bild 3.57) beim Pendelschlag gegen ESG, $t=15\text{ mm}$, $h = 200\text{ mm}$

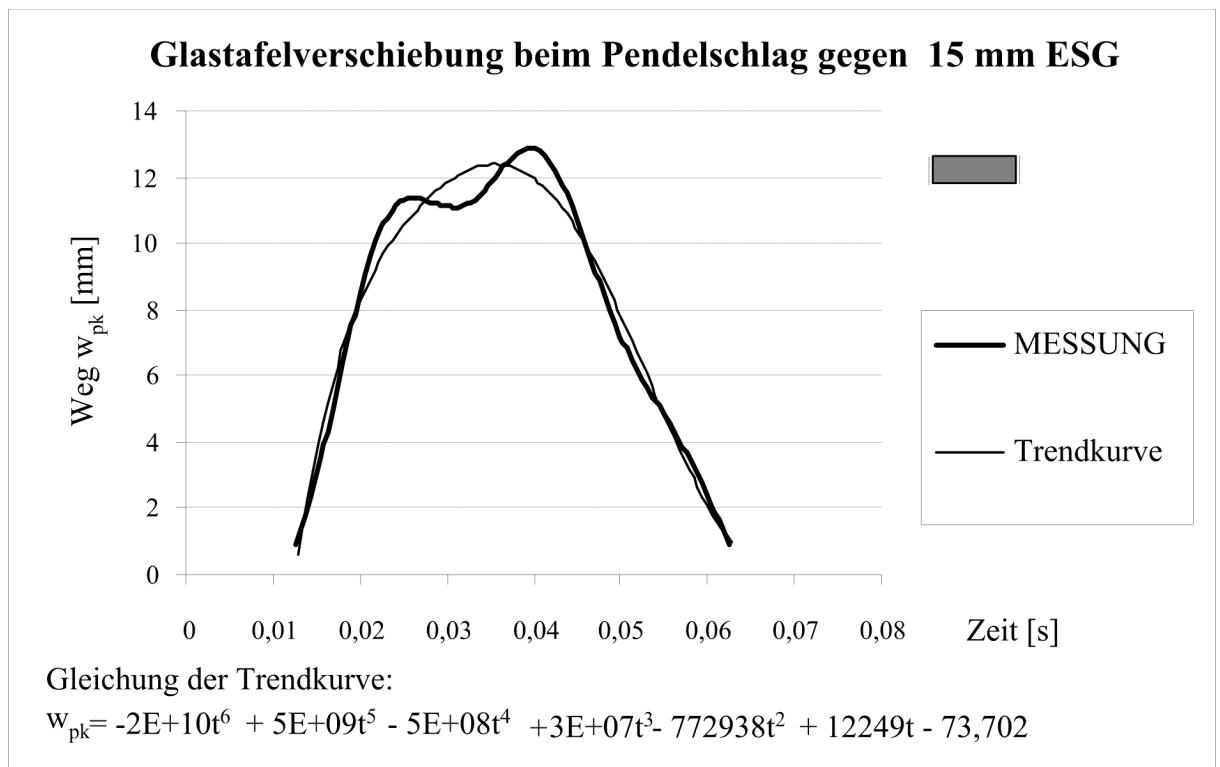


Bild 3.59: Benchmark für eine zweiseitig gelagerte Glastafel $15\text{ mm} \times 360\text{ mm} \times 1.100\text{ mm}$, Stoßkörperanprall $h = 200\text{ mm}$

3.8.3 Pendelschlagversuche auf Mehrscheiben-Isolierglas

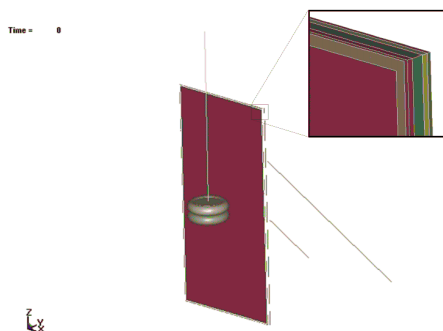


Bild 3.60: FE-Modell einer MSI Tafel

Mit den vorab beschriebenen geometrischen Abmessungen wurde auch eine Mehrscheiben-Isolierglastafel experimentell untersucht. Der Aufbau entsprach 7,75 mm ESG, 16 mm Scheibenzwischenraum, 7,75 mm ESG. In Bild 3.61 sind die Verformungen in Tafelmitte für einen Pendelschlag mit 450 mm Fallhöhe dargestellt. Im Glasbau werden die Glasoberflächen von außen mit eins beginnend aufsteigend nummeriert. Die stoßabgewandte Seite 1 (Außentafel) ist

für den Messwert mit (Bild 3.61, Kurve 1 MW) und für die Simulation (Bild 3.61, Kurve LS-DYNA 1) beschriftet. Die dieser Geometrie tritt kein Glas-Glas-Kontakt zwischen den Glastafeln ein. Die äußere Glastafel wird flächig vom sich ändernden Druck im Scheibenzwischenraum beansprucht. Gegen die innere Glastafel (Seite 4) prallt der Stoßkörper. Der gemessene Zeit-Weg-Verlauf ist mit (Bild 3.61, Kurve 4 MW) und der berechnete mit (Bild 3.61, Kurve LS-DYNA 4) beschriftet.

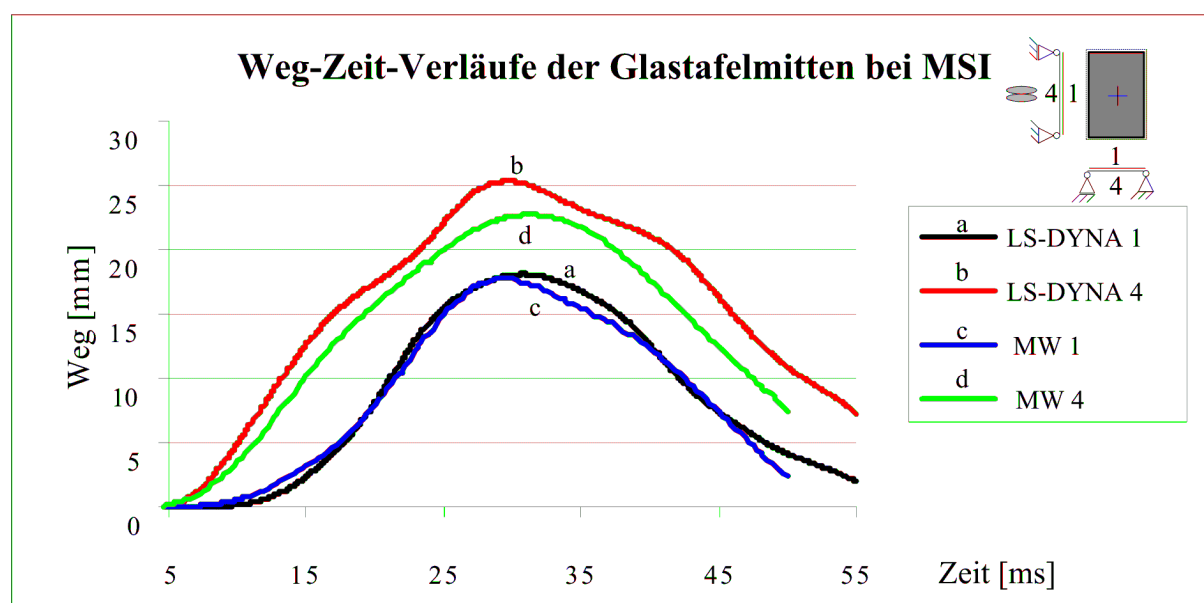


Bild 3.61: Vergleich MSI LS-DYNA, Messwerte [Rü 02a]

In den gemessenen Zeit – Weg – Verläufen sind die Translationen des Prüfrahmens und die Kompression der elastischen Zwischenschichten bzw. des Abstandshalters enthalten. Vergleichsberechnungen ohne diese Einflüsse mit ideal gelenkiger Lagerung (Navierlagerung) sind zur Validierung der Plattenelemente besser geeignet. In Bild 3.62 sind die hiermit berechneten Ergebnisse in den Kurven c und d dargestellt. Werden die mit SJ MEPLA oder LS-DYNA berechneten Glastafelverformungen bei ideal gelenkiger Lagerung und starrem Rahmen mit verschiedenen Modellierungen verglichen, zeigt sich, dass beide Modellierungen übereinstimmende Zeit – Weg – Verläufe berechnen (Bild 3.63).

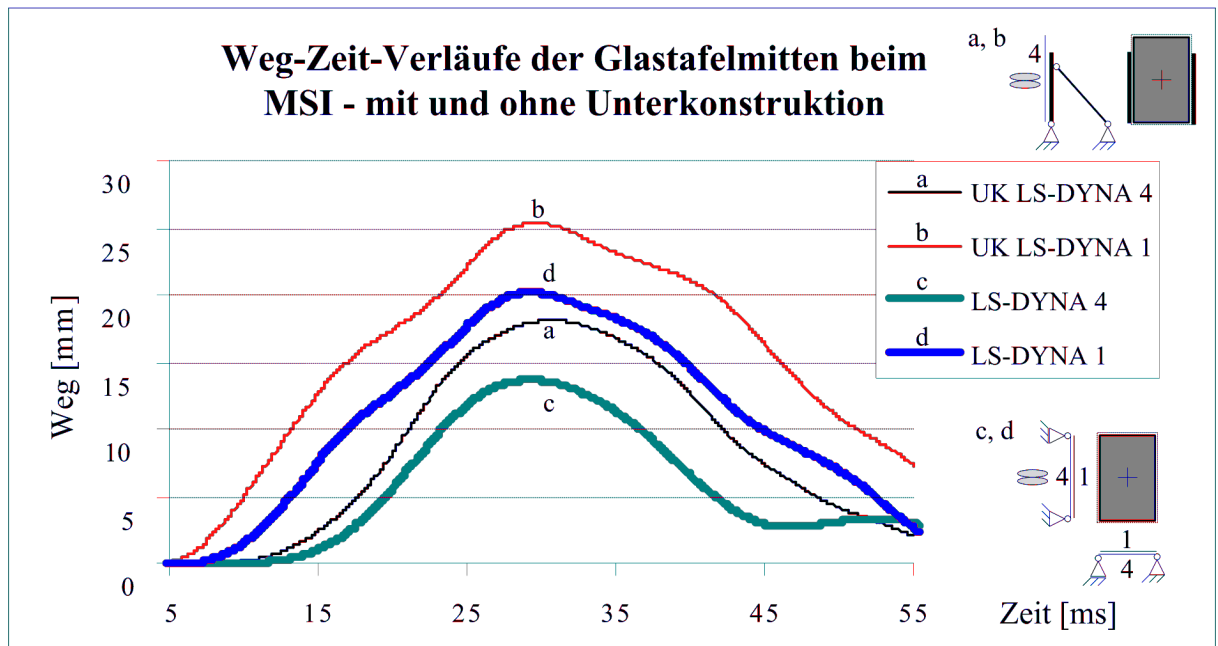


Bild 3.62: Einfluss der Unterkonstruktion

Die Eignung anderer Modellierungen kann mit den Trendkurven aus Bild 3.64 kontrolliert werden. Die Polynome gestatten die einfache Berechnung des Zeit – Weg – Verlaufs. Sie beschreiben die Berechnungsergebnisse der Untersuchungen mit LS-DYNA näherungsweise.

Beim Stoß mit einer Fallhöhe von 450 mm treten die in Tabelle 3.19 genannten Kräfte $F_{\text{Pstoß}}$ im Stoßkörper auf.

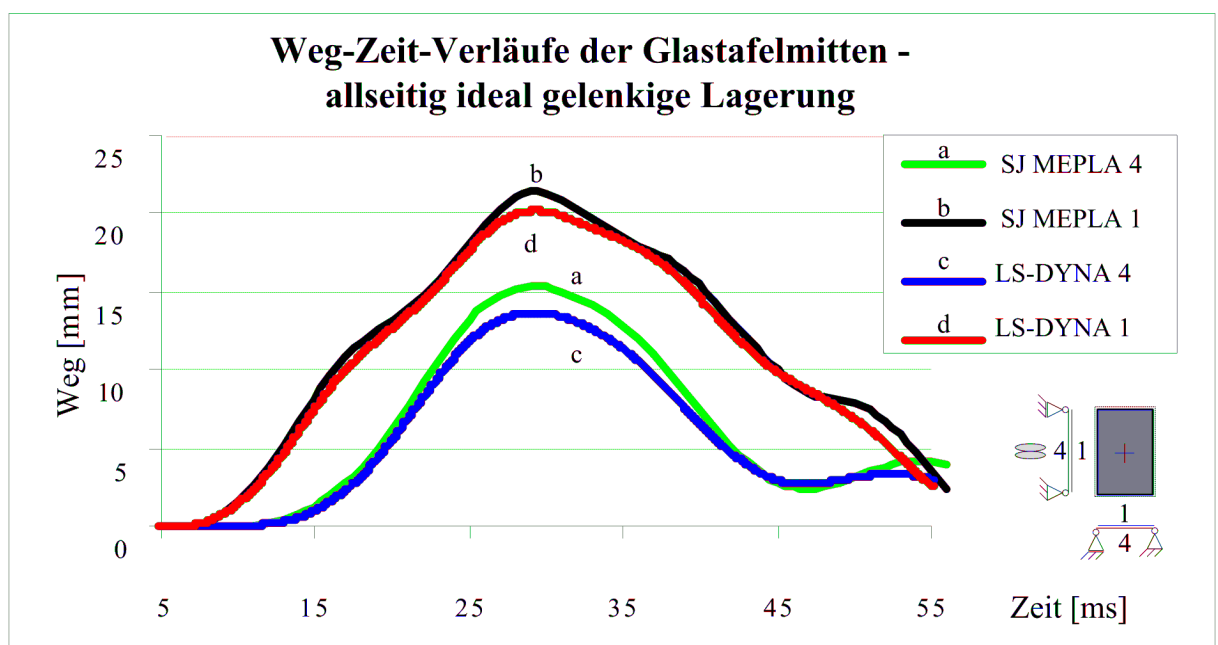
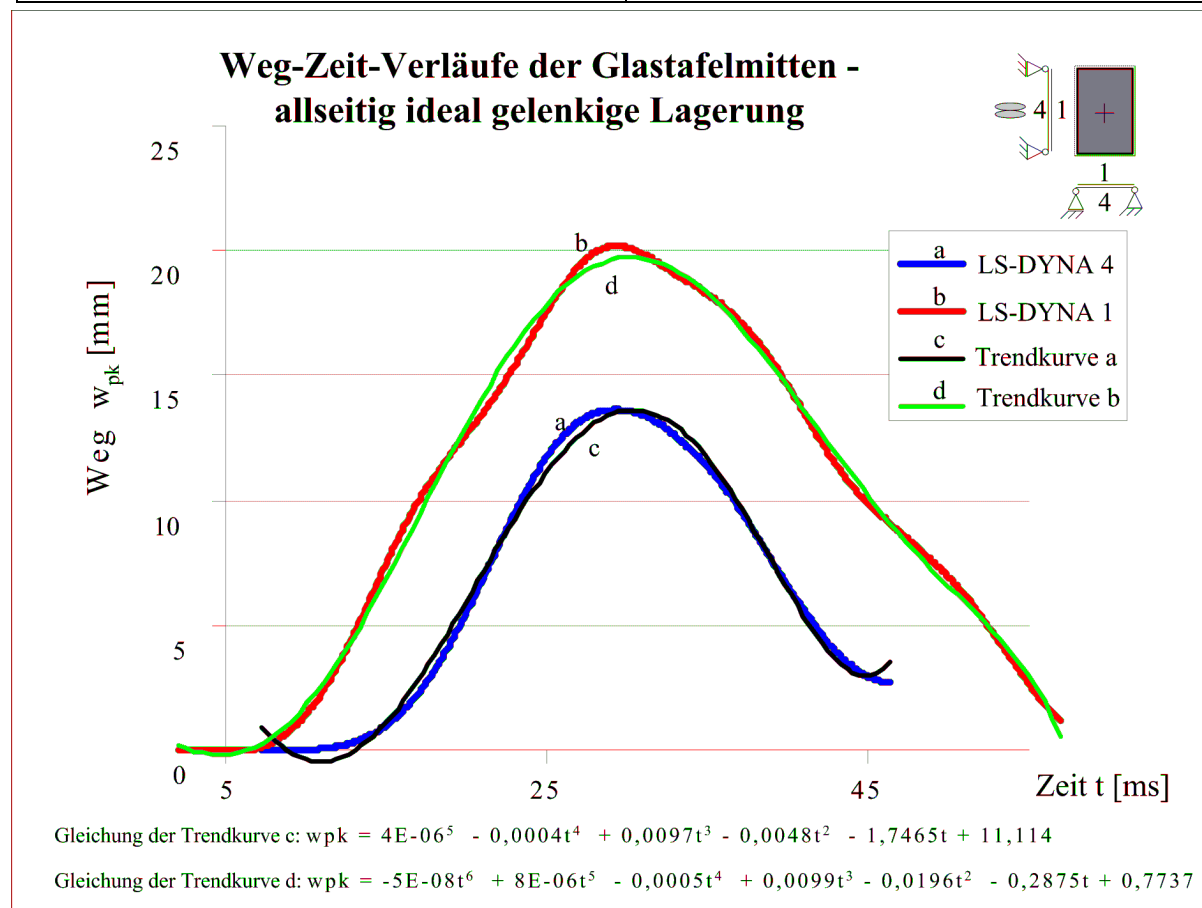


Bild 3.63: Pendelschlag auf MSI mit SJ MEPLA und LS-DYNA

Tabelle 3.19: Kräfte des Pendels beim Stoß auf MSI 8/16/8

Programm	$F_{\text{Pstoß}} [\text{N}]$
SJ MEPLA	9.318
LS-DYNA	9.497

Bild 3.64: Benchmark für allseitig gelagertes Mehrscheiben-Isolierglas 7,75 ESG/ 16 SZR/7,75 ESG, 1.050 mm x 2.056 mm, Stoßkörperanprall $h = 450$ mm

3.9 Diskussion der Ergebnisse

3.9.1 Dynamischer Elastizitätsmodul

Auf Glastafeln mit den Abmessungen 8 mm x 360 mm x 1.100 mm, die zweiseitig ideal gelenkig gelagert sind und direkt auf einem Stahlrahmen aufliegen, werden Pendelschläge ausgeführt. Die gemessenen Zeit – Weg – Verläufe können bei diesem Versuch nicht von einer Randeinspannung am Linienlager beeinflusst werden. Die Messpunktverschiebung wird aus statischer Sicht von der Fallhöhe, dem Auftreffort des Stoßkörpers und den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers (Längen, Plattendicke, Lagerabstände) sowie vom Elastizi-

tätsmodul des Glases beeinflusst. Die Werkstoffeigenschaft ist bei diesem Versuch der einzige Parameter der nicht direkt gemessen werden kann.

Nachfolgend wird gezeigt, dass Glas wie z. B. Beton unter stoßartigen Einwirkungen geschwindigkeitsabhängige Werkstoffeigenschaften hat. Die versteifende Wirkung von Glas unter Stoßeinwirkung wird in der vorliegenden Arbeit mit dem dynamischen Elastizitätsmodul ausgedrückt.

Der Elastizitätsmodul unter quasistatischer Last nach Tabelle 3 wird entsprechend [DIN 1249-10] als „... Richtwert ...“ angenommen. Bei Untersuchungen zu einem Bauvorhaben wurden für Spiegelglas Werte zwischen 67.000 N/mm^2 und 72.000 N/mm^2 gemessen [We 04]. Hintergründe der Streuungen sind nicht bekannt. Für die vorliegende Arbeit durchgeführte Versuche zeigen einen zusätzlichen Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Die rechnerische Auswertung der experimentellen Untersuchungen [Bu 04a] belegt für Glas eine größere Steifigkeit unter stoßartiger Einwirkung. Mögliche Ursachen der Steifigkeitszunahme bei hoher Belastungsgeschwindigkeit sind bisher noch nicht untersucht.

Die Größe des dynamischen Elastizitätsmoduls ist kein konstanter Wert. Ausgehend vom statischen Elastizitätsmodul nimmt der dynamische Elastizitätsmodul mit einer höheren Dehnratengeschwindigkeit zu. In Bild 3.65, Kurven A bis D sind die Messwerte aus [Bu 04a] zusammengestellt. Anhand von Vergleichsberechnungen mit dem validierten FE – Modell in LS-DYNA wird die Größe für die stoßartige Einwirkung beim Pendelschlagversuch ermittelt. Rechnerisch lässt sich der Zeit – Weg – Verlauf der Glastafel während des Stoßes nur beschreiben, wenn modifizierte Werkstoffeigenschaften verwendet werden. Mit einer ungedämpften Simulation und einem statischen E-Modul von 70.000 N/mm^2 werden die Tafelverschiebungen überschätzt (Bild 3.65/G $E_{\text{stat nodamp}}$).

Der dynamische Elastizitätsmodul von Glas, das dem Anprall des Stoßkörpers oder eines Menschen ausgesetzt ist, wird in dieser Arbeit erstmals identifiziert und mit **100.000 N/mm^2** (Bild 3.65/F $E_{\text{dyn nodamp}}$) abgeschätzt.

Die Güte der Übereinstimmung zwischen den Berechnungsergebnissen mit FE-Modellen mit LS-DYNA und den Messwerten des Versuchs lässt sich mit einer zusätzlichen Werkstoffdämpfung (Bild 3.65/E $E_{\text{dyn nodamp}}$) verbessern. Der Ansatz einer Werkstoffdämpfung verlängert den Stoß, unterdrückt die entstehenden Schwingungen, die bei größeren Fallhöhen ausgeprägter auftreten. Die Dämpfung dissipiert Energie, die dann nicht von der Glastafel über Biegung und Dehnung abgetragen werden muss. Für baupraktische Dimensionierungsaufgaben ist es nach Meinung des Autors nicht erforderlich, eine Dämpfung anzusetzen. In Bild 3.65 sind die Berechnungsergebnisse des Stoßkörperanpralls unter der Annahme unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften von Glas gegenübergestellt. Mit der Annahme des quasistatischen Elastizitätsmoduls nach Tabelle 3.20. berechnet sich Kurve G in Bild 3.65. Die berechneten Verformungen liegen deutlich über den Messwerten. Die Glastafel verhält sich unter dem Anprall eines Stoßkörpers steifer.

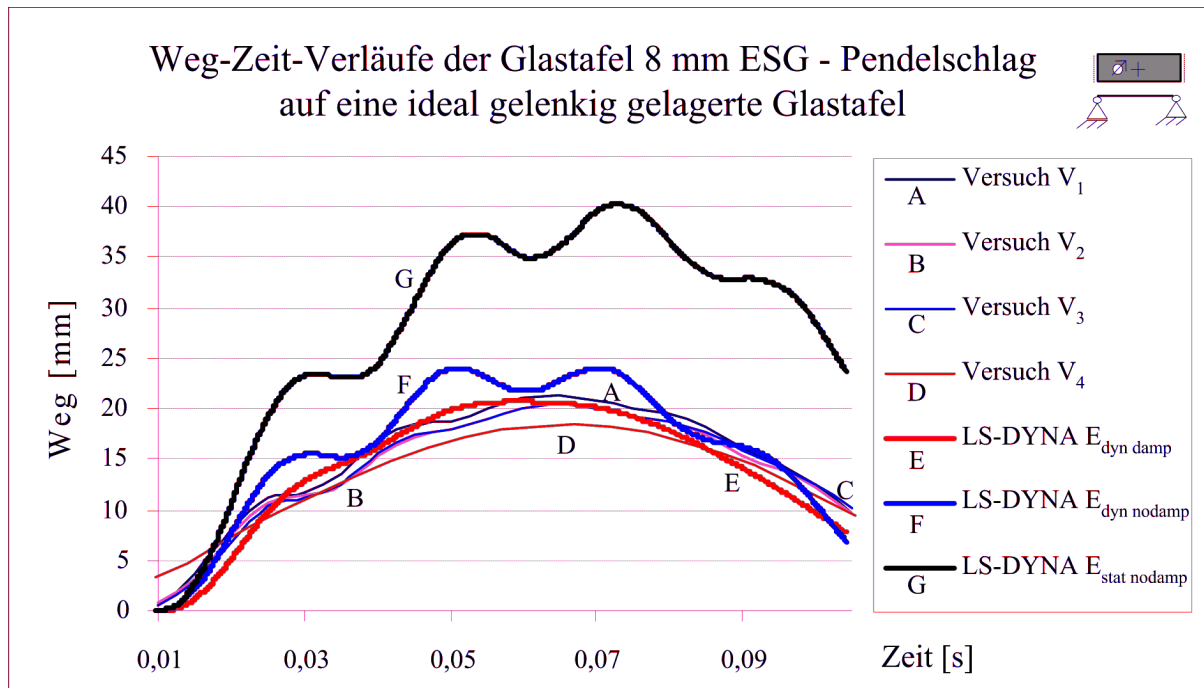


Bild 3.65: Dynamischer Elastizitätsmodul von Glas bei Stoßeinwirkung (Messdaten aus [Bu 04a])

Tabelle 3.20: Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls

Kurven	Werkstoffkennwerte	Bemerkung
A – D	Die Steifigkeiten der Glastafeln sind im Versuch unbekannt	Messwerte [Bu 04a]
E	E = 100.000 N/mm ² 0,1 % massenabhängige Dämpfung	-
F	E = 100.000 N/mm ²	Abschätzung des dynamischen Elastizitätsmodul für Glas unter Stoßeinwirkung
G	E = 70.000 N/mm ²	Statischer Elastizitätsmodul

Aus den Messergebnissen von [Bu 04a] ergibt sich eine maximale Dehnrates von $140,85 \frac{\mu\text{m}}{\text{ms}}$, die in der 8 mm dicken Glastafel 5,6 ms während dem Stoßkörperanprall mit 180 mm Fallhöhe auftritt. Die durchschnittliche Dehnrates während der Dekompressionsphase beträgt $56,67 \frac{\mu\text{m}}{\text{ms}}$. Ab welcher Dehnrates der Elastizitätsmodul des Glases ansteigt ist nicht bekannt.

In Bild 3.66 sind die maximalen Messpunktverschiebungen der Glastafel für unterschiedliche Stoßkörperfallhöhen dargestellt. Es wurde ein linearer Zusammenhang festgestellt. So treten auch bei kleinen Fallhöhen Dehnrates auf, bei denen der Elastizitätsmodul von Glas ansteigt.

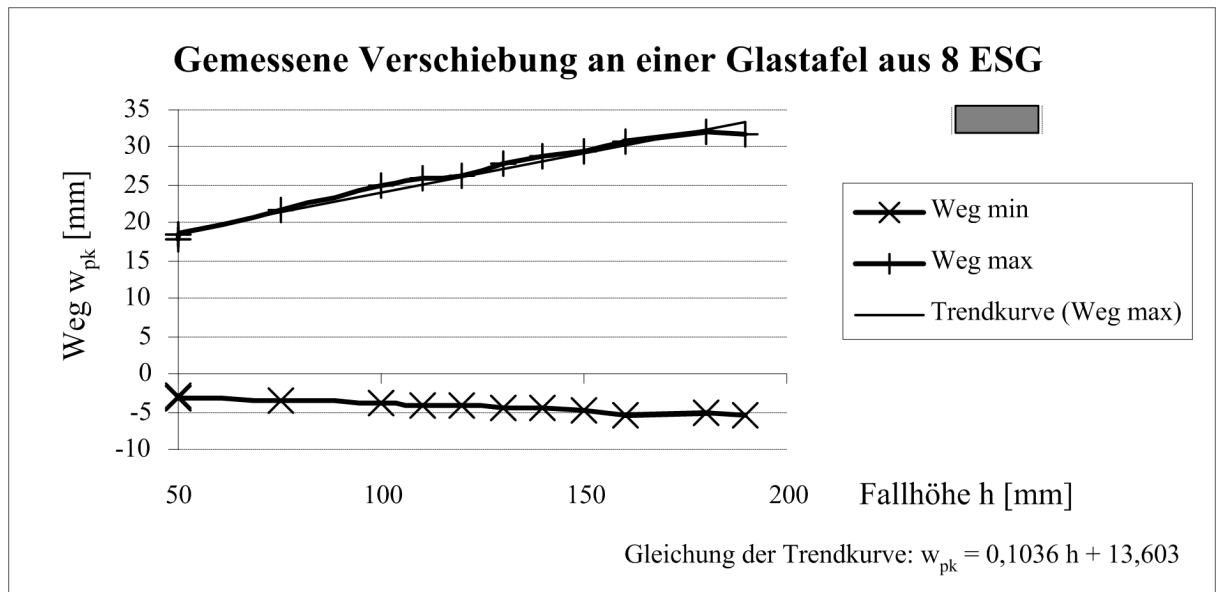


Bild 3.66: Gemessene Tafelverschiebung abhängig von der Fallhöhe (Messdaten aus [Bu 04a])

Im Versuch wurden in Tafelmitte Dehnungen gemäß Bild 3.61 gemessen. Die Berechnungsergebnisse mit einem Elastizitätsmodul von 70.000 N/mm² (Bild 3.68, Kurve 180 E_{stat}) und einem dynamischen Elastizitätsmodul von 100.000 N/mm² (Bild 3.68, Kurve 180 E_{dyn}) sind den Messwerten gegenübergestellt.

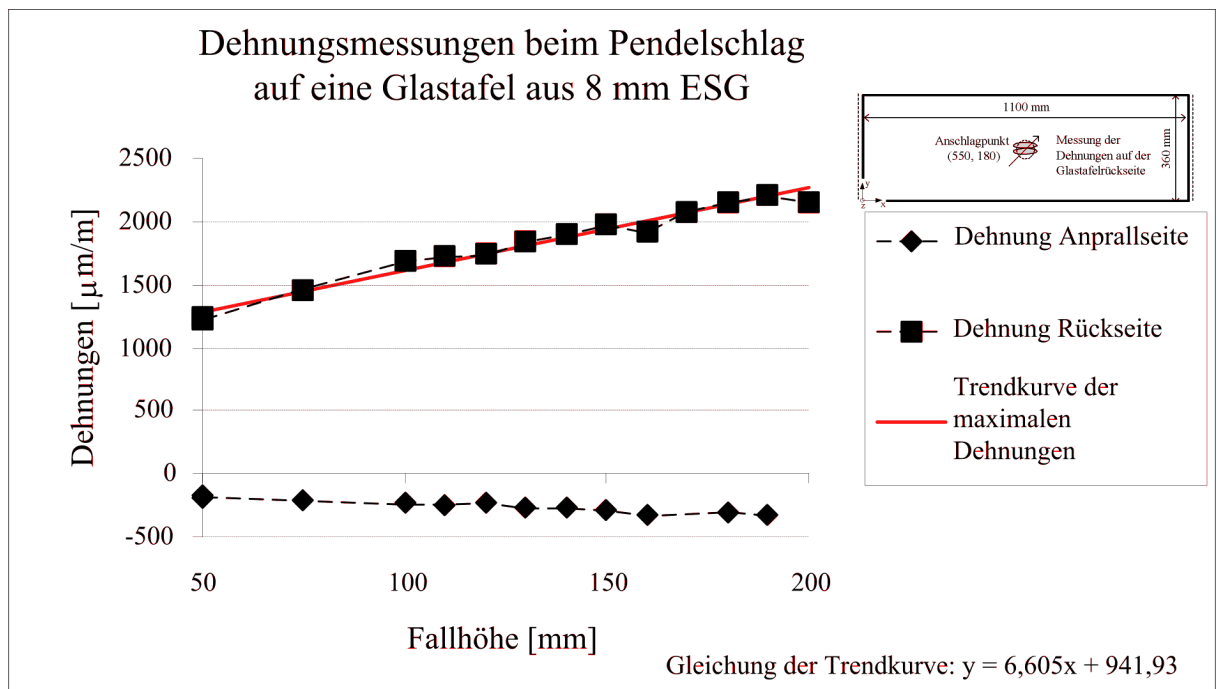


Bild 3.67: Gemessene Dehnungen in Abhängigkeit von der Fallhöhe (Messdaten aus [Bu 04a])

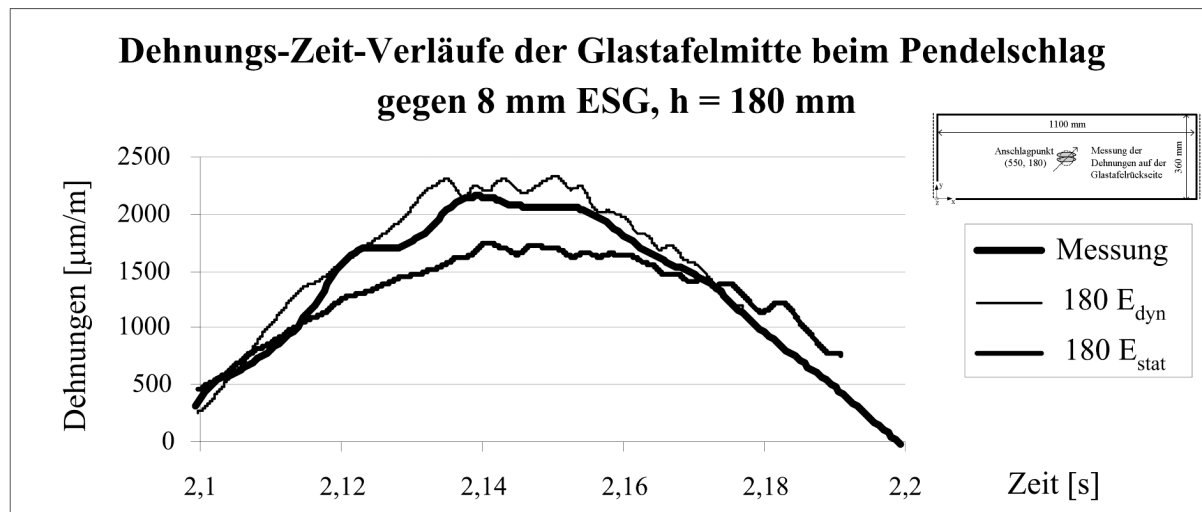


Bild 3.68: Vergleich der Dehnungen zwischen Messung und Berechnung, Fallhöhe $h = 180$ mm

3.9.2 Verbundverhalten unter Stoßeinwirkung

In [Sc 03] finden sich Hinweise, dass auch unter schneller Einwirkung bei VSG keine volle Verbundtragwirkung vorliegt. Dennoch darf entsprechend den [TRAV 03], Anhang C, für die stoßartige Einwirkung des Pendelschlages die volle Verbundtragwirkung vorausgesetzt werden. Das heißt, hier darf für die Dimensionierung eine wirksame Bauteildicke entsprechend der Summe der Einzelglasdicken angenommen werden. Die Aussage, dass lediglich ein Teilverbund aktiviert wird, ist durch Messwerte zum Verformungsverhalten einer VSG-Tafel unter Stoßeinwirkung, dokumentiert in [Bu 02], Anhang 5, bestätigt.

Ergebnisse experimenteller Untersuchungen, die das Ziel hatten, dynamische Werkstoffparameter von VSG-Tafeln zu ermitteln, sind in [Bu 04a] dokumentiert. Diese Daten wurden damals jedoch nicht weiter ausgewertet. Die unterschiedlichen Zeit – Weg – Verläufe von monolithischen bzw. Verbund-Sicherheitsglastafeln (Bild 3.69) belegen, dass kein voller Verbund zwischen den Schichten besteht. Es zeigt sich zudem ein gewisser Temperatureinfluss bei VSG. Untersucht wurden zweiseitig gelagerte rechteckige Glastafeln mit den Abmessungen 360 mm x 1.100 mm. Die PVB-Folie hatte eine Dicke von 0,76 mm. Die Fallhöhe des Stoßkörpers betrug 100 mm.

Bei vollem Verbund müssen sich Glastafeln mit identischer Gesamtdicke gleich verformen. Es wird 8 mm dickes monolithisches ESG mit VSG aus 2 x 4 mm ESG und 0,76 mm PVB-Folie verglichen. Zusätzlich wurde die Temperatur des VSG mit 5° C und 25° C variiert. Die Messwerte belegen ein unterschiedliches Verformungsverhalten, damit ist die Vermutung, dass nur ein Teilverbund vorhanden ist, bestätigt. In Bild 3.70 sind exemplarisch gemessene Verläufe aus [Bu 04a] für 8 mm dickes monolithisches ESG (ESG₃), 2 x 4 mm dickes, 5° C kaltes VSG (VSG_{8_2k}) und 25° C warmes VSG (VSG_{8_3w}) gegenübergestellt.

Die PVB-Folie dämpft die Schwingungen der Glastafel. Infolge des Teilverbundes verformen sich die VSG-Tafeln stärker als die ESG-Tafel. Die wärmere Tafel hat einen geringeren Schubmodul, die Stoßphase wird verlängert. In [Br 01] wurden Verbund-Sicherheitsglastafeln

bei Raumtemperatur gependelt und mit Berechnungsergebnissen mit SJ MEPLA verglichen. Diesen Berechnungen lagen die Annahmen: elastischer Elastizitätsmodul von Glas und voller Verbund zwischen Glas und PVB-Folie zugrunde. Die untersuchten Geometrien entsprachen üblichen Anwendungen im Bauingenieurwesen. Die Übereinstimmung zwischen Berechnungsergebnissen und den Zeit – Weg – Verlaufs- und Dehnungsmessungen wurde als ausreichend erachtet.

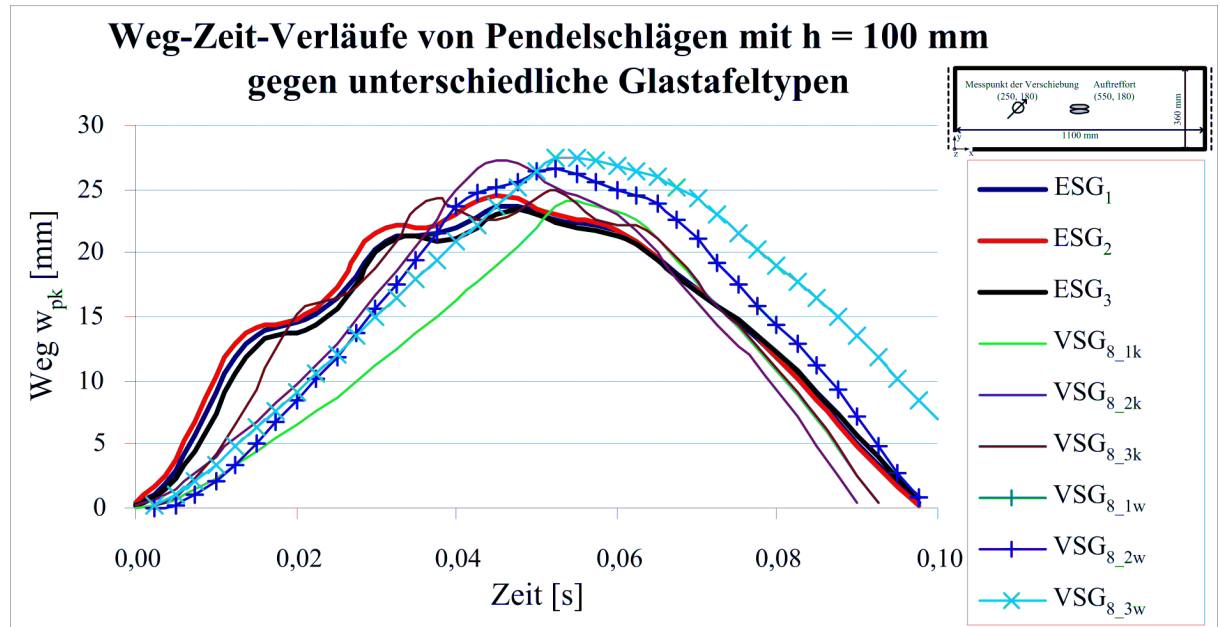


Bild 3.69: Gemessene Zeit – Weg – Verläufe unter Stoßeinwirkung (Messdaten aus [Bu 04a])

Die Effekte infolge eines erstmals in [Bu 04a] systematisch untersuchten, dehngeschwindigkeitsabhängigen Elastizitätsmodul E_{dyn} und dem steifigkeitsreduzierenden Teilverbund kompensieren sich teilweise. Zutreffend ist der Ansatz des Teilverbundes und eines dynamischen Elastizitätsmoduls für den Werkstoff Glas.

Bild 3.70 können die im Messpunkt gemessenen Verschiebungen mit 24 mm für monolithischen ESG und 27 mm für VSG entnommen werden. Es stellt sich die Frage, wie hoch der Verbundgrad der Glastafel unter der Stoßeinwirkung war.

Die 8 mm dicke ESG-Tafel stellt den Grenzfall des vollen Verbundes dar. Mit der Annahme, die Stoßkörperkraft wirkt als Einzellast mittig auf einen Balken auf zwei Stützen, kann aus der gemessenen Verschiebung (24 mm im Drittelpunkt) auf die einwirkende Kraft zurückgerechnet werden. Setzt man die so berechnete statische Ersatzkraft auf eine Glastafel ohne Verbund (2 x 4 mm) an, berechnet sich die zugehörige Verschiebung mit 96 mm. Diese Durchbiegung stellt die untere Grenze ohne Verbund dar. Ausgehend von den Verhältnissen: kein Verbund und 96 mm Verschiebung und voller Verbund und 24 mm Verschiebung berechnet sich für die gemessene Verschiebung der VSG Einheit unter Stoßeinwirkung mit 27 mm ein Verbundanteil von 96 %.

Damit liegen die Vorgaben der TRAV, die für den Anprall den Ansatz eines vollen Verbundes zulassen ausreichend nahe an der Wirklichkeit.

Die gemessenen Zeit – Weg – Verläufe der VSG-Tafel in Bild 3.70 werden auch durch FE – Analysen mit SJ MEPLA erhalten, wenn für das Glas der dynamische Elastizitätsmodul von 100.000 N/mm^2 und für die PVB-Folie ein Elastizitätsmodul von 5 N/mm^2 und eine Querdehnzahl von 0,5 angesetzt werden. Gegenüber dem monolithischen Ansatz der TRAV erhält man dabei rechnerisch 2 % höhere Spannungen.

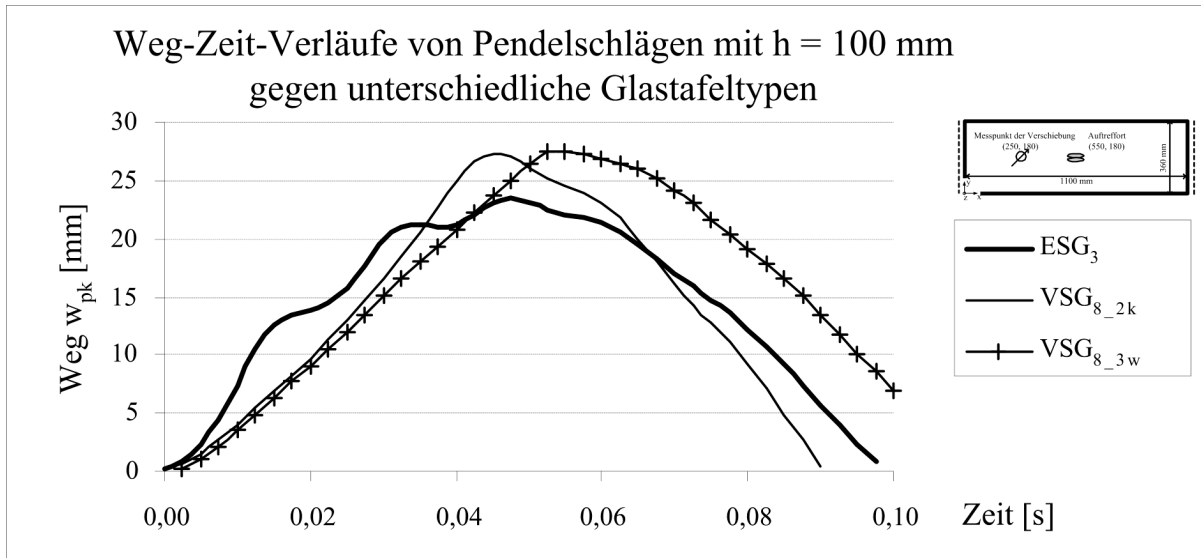


Bild 3.70: Weg – Zeit – Verläufe der Prüfkörper aus unterschiedlichen Glasarten (Messdaten aus [Bu 04a])

3.9.3 Gegenüberstellung Bauteilversuch – rechnerische Simulation

Mit transienten FE – Berechnungen kann der Anprall eines Stoßkörpers auf einem Prüfkörper rechnerisch simuliert werden. In der Berechnung können verschiedene Stoßkörpermodellierung (Stoßkörpertypen) zur Simulation des Anpralls auf die Glastafel eingesetzt werden. Werden die Ergebnisse eines Rechenmodells mit Werten aus Bauteilversuchen bestätigt (Validierung), steht eine Nachweismethode zur Verfügung, mit der beliebige Tafelgeometrien und Lagerungsarten mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden können.

Sowohl für den Bauteilversuch als auch für die Simulation lassen sich Vor- und Nachteile finden. Die Wucht mit der ein Stoßkörper auf das Glas aufschlägt, suggeriert dem Beobachter eines Bauteilversuchs Vertrauen in die geprüfte Konstruktion. Die vorherrschende Versuchsgläubigkeit führt zur Akzeptanz bei den am Bau Beteiligten. Versagt eine Konstruktion, ist das negative Ergebnis offensichtlich: Der Glasbruch ist anschaulicher als eine Überschreitung der zulässigen Spannung in der FE – Analyse. Ein weiterer Vorteil des Versuchs ist, dass konstruktive Fehler aufgedeckt werden, die nicht ursächlich mit dem Glas in Verbindung stehen (siehe ungenügend angeschraubter Pfosten in Bild 4.9). Diese Mängel können mit idealen FE – Modellen nicht erkannt werden. Bei Konstruktionen mit Verbindungen, die auf Kontakt und Klemmung wirken (Klippsysteme auf Schrauben mit linsenförmigem Kopf etc.) oder sonstigen Konstruktionen, bei denen Werkstoffeigenschaften nicht bekannt sind, ist der Bauteilversuch zur Beurteilung der Tragfähigkeit das geeignete Nachweisverfahren. Aufgrund der geringen Probenanzahl (in der Regel zwei) sind jedoch keine statistisch aussagekräftigen

Bewertungen möglich. Das Konzept ist pragmatisch und einfach, dafür müssen Unsicherheiten mit einer pauschalen Erhöhung der Fallhöhe (Prüfenergie) abdeckt werden.

Im Bauteilversuch wird der Neuzustand der Konstruktion geprüft. Somit liefert der Bauteilversuch nicht zwingend Aussagen über die Tragfähigkeit während der gesamten Lebensdauer. Es ist bekannt, dass Umwelteinflüsse die Festigkeit von Glas verändern können [Rü 02a]. Als korrosive Einwirkung gelten: Luft, Niederschläge oder der Anprall von kleinen Partikeln und größeren Gegenständen bei Wind. Werden die Glastafeln gereinigt, wirken mechanische und chemische Angriffe auf diese ein. Die Folge können Festigkeitsdifferenzen zwischen Neu- und Nutzungszustand sein. Problematisch sind diese Einflüsse, wenn die äußere Tafel monolithisch aus Spiegelglas gefertigt wird. Beim Menschenanprall entstehen Biegezugspannungen auf der Außenseite, die eine unbeschädigte Glastafel möglicherweise ertragen kann. Eventuell führen die Vorschädigungen auf der Oberfläche jedoch bei einem identischen Anprall zu einem späteren Zeitpunkt zum Glasbruch. Die inneren Glasoberflächen im Verbund-Sicherheitsglas oder im Scheibenzwischenraum bei Isolierglastafeln sind geschützt. Bisher gibt es keine Hinweise, dass sich die Bruchspannungen dieser Tafeln während der Lebensdauer verändern. Ein anderer Fall liegt vor, wenn außen Spiegelglas eingesetzt ist. Die Prüfung im Neuzustand, die eine Beurteilung über die gesamte Lebensdauer liefern muss, erfolgt ohne nutzungsbedingte Schädigungen (Kratzer bei der Reinigung, Anprall von Sandkörnern die der Wind mitführt etc.). Falls die Glastafel während der Nutzung derart geschädigt wird, dass eine bleibende Festigkeitsminderung vorliegt (z. B. tiefer Kratzer, aggressive Medien), wäre eine Aussage auf der Basis eines Versuchs im Neuzustand nicht zwingend eine ausreichend sichere Abschätzung für die gealterte Glastafel. Eine vorgeschädigte Glastafel könnte durchaus bei gleicher Einwirkung versagen, bei der der Pendelschlagversuch als bestanden gewertet wurde.

Das Aufbauen geeigneter FE – Modelle ist komplex und erfordert Erfahrung. Die maßgebenden Lastpfade und Tragmechanismen müssen vom Modell erfasst werden. Dazu ist die Kenntnis der relevanten Einflüsse beim Stoßvorgang (siehe 3.6.4) erforderlich. Berechnungen können zur Lösung verschiedener Fragestellungen durchgeführt werden. So lässt sich neben einer Spannungsrechnung auch die Bruchlast oder die vorhandene Sicherheit gegen Versagen ermitteln. Eine Variantenstudie kann die Planungsphase begleiten und steuern. Berechnungen erfolgen mit reproduzierbarer Genauigkeit und definiertem Sicherheitsniveau. Zufallseffekte, wie Glasüberfestigkeiten, gebremste Auslösung des Stoßkörpers etc., die Versuche verfälschen, können ausgeschlossen werden. Mit validierten FE – Modellen lassen sich Konstruktionen mit dem im Bauwesen üblichen Sicherheitsniveau nachweisen. In der rechnerischen Simulation kann der Alterungseinfluss bewertet werden, falls die charakteristischen Biegebruchspannungen von gealtertem Glas als Grundlage des Nachweises verwendet werden. Der Anwender muss davon ausgehen, dass die nach der TRAV zulässigen Biegezugspannungen unter stoßartiger Einwirkung diese Effekte berücksichtigen. Berechnungen können für beliebige Klimabedingungen (Temperaturen, Luftdruck) durchgeführt werden. Rechnerisch könnten die einzelnen Energieanteile ausgewertet werden und somit wird ein einheitliches Prüfzenario (übertragene Energien) Zugrunde gelegt. Zusammengefasst bedeutet dies,

dass situationsbezogen differenziertere Nachweise mit angepassten Einwirkungen möglich sind.

Realitätsnahe Untersuchungen können mit Stoßkörpern, die dem Menschen nachempfunden sind (Dummys), durchgeführt werden.

Bei der Bewertung bereits ausgeführter Verglasungen besteht der Vorteil, dass kein Imageverlust der am Bau Beteiligten entsteht, wie es bei gescheiterten „Vor-Ort-Prüfungen“ vorgekommen ist. Teilweise haben bereits ausgeführte Verglasungen den Pendelschlagversuch nicht bestanden. Die gesamte Verglasungskonstruktion musste ertüchtigt bzw. ausgetauscht werden. Zum Teil haben sich schon lastweiterleitende Bauprodukte beim Pendelschlagversuch plastisch verformt. Neben den Kosten des eigentlichen Versuchs können dann zusätzliche kostspielige Reparaturen der Unterkonstruktion erforderlich werden. Mit der rechnerischen Simulation lassen sich Planungszeiten verkürzen, da einzelne Planungsschritte oder Variantenstudien parallel laufen können. Virtuelle Prototypen lassen sich kurzfristig erstellen, sind günstig und leicht zu ändern, die Anzahl der experimentellen Untersuchungen ließe sich auf die zur Validierung unbedingt erforderlichen reduzieren. Alternative Konstruktionsvarianten können untersucht werden. Fragen nach Optimierungsmöglichkeiten oder Kontrollen bestehender Verglasungen bei Umbauten und Ertüchtigungen im Bestand z. B. denkmalgeschützte Gebäude sind einfacher realisierbar. Die vorhandene Sicherheit lässt sich berechnen und entsprechend den örtlichen Gegebenheiten beurteilen.

3.10 Zusammenfassung

Bei der Modellierung des Pendelschlags müssen zahlreiche Annahmen getroffen werden. Mindestanforderungen an ein geeignetes FE – Modell sind eine geeignete Vernetzung, sowie reale Massen- und Steifigkeitsverhältnisse der Stoßpartner. Nur so kann das Verformungs- und das Schwingungsverhalten der Glastafel hinreichend genau abgebildet werden. Geometrisch nichtlineare Modellierungen mit LS-DYNA oder SJ MEPLA sind in der Lage, das schwingende System Glastafel und Stoßkörper während des Stoßes realitätsnah abzubilden. Die Eignung der einzelnen in der Simulation verwendeten Komponenten muss an Versuchsdaten validiert (kalibriert und überprüft) werden. Der Anwender kann dies anhand der hier vorgestellten Versuchsdaten durchführen.

Das lineare Zweimassenschwingermodell ist als statisches Ersatzmodell ein wichtiges Hilfsmittel, mit dem die Größenordnung der Stoßkräfte und die Einwirkungsdauer des Stoßes abgeschätzt werden kann. Erstmals wurden damit auch die elastische und kinetische Energie der Glastafel während des Stoßvorganges rechnerisch ausgewertet. Während des Stoßes auftretende nichtlineare Effekte können mit diesem Modell nicht abgebildet werden. Da lineare transiente Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente möglich sind, erscheint es nicht zielführend, ein grob vereinfachtes, unwirtschaftliches Bemessungsverfahren basierend auf der Lösung des Zweimassenschwingers anzubieten. Bei Sondersituationen wie z. B. der starren Wand können die Ergebnisse des Zweimassenschwingers zur Validierung eines Finite Elemente Modells zur Simulation eines Pendelschlages verwendet werden.

Die Güte der FE – Modellierung wurde anhand von Messergebnissen überprüft. Nachdem das FE – Modell die Ergebnisse von Pendelschlagversuchen auf unterschiedliche Glastafeln (Geometrie und Glasaufbau) in guter Näherung simuliert, kann es auch für weitere Simulationen ähnlicher Geometrien als geeignet angesehen werden. Mit den validierten FE – Modellen wurden verschiedene Stöße auf Glastafeln mit den Programmen SJ MEPLA und LS-DYNA simuliert. Die Berechnungsergebnisse der validierten Modelle beider Programme stimmen überein und werden durch die Daten der durchgeführten Bauteilversuche bestätigt. Damit ist belegt, dass der Pendelschlagversuch ausreichend genau simuliert werden kann. Auf dieser Basis wurden systematische Parameterstudien durchgeführt, welche das Verhalten der Glastafel und des Stoßkörpers während des Pendelschlagversuchs zeigen. Ein Modul, das die Energien aus den Stoßsimulationsergebnissen von SJ MEPLA auswertet, wurde zusätzlich erarbeitet. Mit diesen Hilfsmitteln lassen sich absturzsichernde Glastafeln für ein definiertes Sicherheitsniveau nachweisen.

Für den Nachweis von absturzhemmenden Glastafeln kann auf die Berücksichtigung der Werkstoffdämpfung verzichtet werden. Dabei können die Glastafeln für übliche Pressleistensysteme mit bis zu 15 mm Glaseinstand als ideal gelenkig gelagert angenommen werden.

Die Vorgaben der TRAV zum Ansatz des vollen Verbundes bei VSG unter stoßartiger Einwirkung konnten anhand der Auswertung von Versuchsdaten gerechtfertigt werden. Ferner wurde erstmals die dynamische Steifigkeit des Werkstoffs Glas unter Pendelschlageinwirkung ermittelt.

Nach Meinung des Autors liegt die Aussagegenauigkeit der validierten FE – Simulation von allseitig liniengelagerten Glastafeln in der Größenordnung des Bauteilversuchs, da Messdaten von Pendelschlagversuchen mit unterschiedlichen Glastypeen, Lagerungsarten und Fallhöhen mit sehr guter Näherung beschrieben werden konnten. Somit lassen sich auch mit der rechnerischen Simulation absturzhemmende Glastafeln sicher nachweisen.

Die Erkenntnisse aus den Parameterstudien werden in das neue Bemessungskonzept für absturzhemmende Glastafeln eingearbeitet. Somit sind die rechnerischen Nachweise nicht nur sicher sondern auch wirtschaftlich. Dieses Konzept wird in Kapitel 4 vorgestellt.

4 Bemessungsvorschlag zur rechnerischen Bewertung der Tragfähigkeit einer absturzhemmenden Glastafel

4.1 Allgemeines

Ein Bemessungsvorschlag muss sichere und unsichere Konstruktionen offen legen. Angewendet wird er nur, wenn er auch wirtschaftliche Konstruktionen ermöglicht. Dies ist gewährleistet, wenn die Vorgaben der GRUSIBAU und der DIN 1055-100 beim rechnerischen Nachweis der Tragfähigkeit der Glastafel beim Menschenanprall beachtet werden.

Der hier vorgestellte Bemessungsvorschlag zum *rechnerischen Nachweis einer absturzhemmenden Glastafel unter stoßartiger Einwirkung* baut auf den dargestellten Parameterstudien auf und berücksichtigt die untersuchten Effekte beim Stoß.

Geeignet ist dieses Vorgehen für übliche Einbausituationen in Hochbauten. Eine Konstruktion ist unter Stoßeinwirkung standsicher, wenn sie der nach UEAtc, Tabelle 2.1, geforderten Energie standhält. Der Energiewert wird ersatzweise für den Menschenanprall angesetzt. Entsprechend den Regeln der Technik wird diese Nachweisform im Folgenden auf absturzhemmende Glastafeln erweitert. In FE – Analysen kann die vom Stoßkörper auf die Glastafel übertragene Energie ausgewertet werden. Der Vergleich mit einem konstanten Bemessungswert ist nur bis zu bestimmten Glastafelgewichten sinnvoll, da ein Stoßkörper abhängig von den Massen- und Steifigkeitsverhältnissen der Stoßpartner eine definierte Energie auf die Glastafel überträgt. Bei leichten, nachgiebigen Tafeln muss die eingetragene Energie von der sich verformenden Glastafel abgetragen werden. Mit zunehmendem Glastafelgewicht erreicht die Trägheitskraft während des Stoßes einen hohen Anteil am Kräftegleichgewicht zwischen den Stoßpartnern. Wollte man auch bei diesen schweren und steifen Konstruktionen die definierte Energie einleiten, müsste das Prüfszenario des Pendelschlages mit unrealistisch hohen Prüfeinwirkungen beaufschlagt werden, um die geforderte Energie zu übertragen.

Die Tragfähigkeit einer Glastafel unter Stoßeinwirkung wird von unterschiedlichen Mechanismen beeinflusst, die als Thesen nachfolgend aufgeführt sind:

Die beim Anprall einwirkende Energie muss von der Glastafel als elastische Energie (Verformung) und kinetische Energie (Geschwindigkeit) aufgenommen werden. Eine „leichte“²³ Glastafel wirkt absturzhemmend, falls die Summe der Energieanteile mindestens der erforderlichen einzutragenden Energie entspricht und dabei die Grenzbiegezugspannungen nicht überschritten sind. Die Trägheitskraft dieser Glastafeln ist noch deutlich kleiner als die Stoßkörperkraft.

²³ Die bisher unbestimmten Begriffe: „leichte“ und „schwere“ Glastafel werden im Zusammenhang des Bemessungskonzeptes in Abschnitt 4.3.4 definiert.

Bei „schweren“ Glastafeln wirkt eine große Trägheitskraft gegen die Stoßkörperkraft. Die Trägheitskraft hält dem anprallenden Menschen maßgeblich das Gleichgewicht. Im Grenzfall des idealen Stosses (unendlich schwere Glastafel), sind die Trägheitskraft und die Stoßkörperkraft betragsmäßig gleich, dabei wird in die Glastafel keine Energie eingetragen.

Das nachfolgende Bemessungskonzept berücksichtigt das unterschiedliche Verhalten von leichten und schweren Glastafeln. Es stellt sich die Aufgabe, Kriterien zur Abgrenzung dieser beiden Tragmechanismen vorzuschlagen. Der Bemessungsvorschlag ist auf dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept aufgebaut. Damit sind relevante Einflussparameter direkt erkennbar, die situationsbezogen für die Nachweise absturzhemmender Glastafeln angepasst werden können.

Die erforderlichen Parameter für den Nachweis auf der Basis des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes werden in Kapitel 4.2 aufgearbeitet. Der Ablauf des Nachweises wird in Kapitel 4.3 graphisch dargestellt. Formeln zur Vordimensionierung der Glastafel unter statischer Holmlast werden in Kapitel 4.3.1 vorgestellt. In Kapitel 4.4 werden einige Glastafeln beispielhaft mit dem Bemessungsvorschlag untersucht.

Die in Kapitel 5.4.2 vorgestellten Berechnungen mit einem Dummy, der zur Simulation eines Seitenanpralls im Automobilbau entwickelt wurde, bestätigen das vorgestellte Nachweiskonzept.

Die derzeit noch bestehende Erfahrungslücke bei Verwendung dieses Nachweiskonzeptes soll mit Kontrollen der ausgeführten Konstruktion kompensiert werden. Vorgeschlagen werden Hinweise, die bei der Bauabnahme zu berücksichtigen sind. Diese Hinweise leiten sich aus Fehlern und Problemen ausgeführter absturzsichernder Konstruktionen und den Erfahrungen von durchgeführten Pendelschlagversuchen ab.

Die Nachweismethode des Pendelschlagversuchs zur Beurteilung der Tragfähigkeit einer absturzsichernden Verglasung unter stoßartiger Einwirkung nach den TRAV ist etabliert. Fragen von Kritikern zu dem hier vorgestellten Bemessungskonzept sind wahrscheinlich, die für Glas erarbeitete Bemessungsenergie gegenüber der potentiellen Energie eines auf 900 mm ausgelenkten Pendels erscheint gering. Dabei ist folgendes zu beachten:

Bisher war nicht bekannt, welche kinetische und welche elastische Energie tatsächlich auf die Glastafel übertragen werden. So erfolgte jede Prüfung mit dem Pendelschlagversuch mit unterschiedlicher Sicherheit. Es gibt durchaus auch Konstruktionen, die annähernd die bekannten Fallhöhen erfordern um diese Energie zu übertragen (siehe Anhang A 15.3).

Probleme, Unfälle oder Schadensfälle an Konstruktionen aus anderen Baustoffen, die seit Jahren erfolgreich nach dem Konzept der ETB-Richtlinie mit einer definierten Basisenergie nachgewiesen werden, sind nicht bekannt. Damit entspricht dieses Vorgehen dem Stand der Technik.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden FE Simulationen mit einem realistischen Dummy als Stoßkörper durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse bestätigen die von der UEAtc gefor-

derte charakteristische Energie zur Bemessung. Diese Energie wurde aus Versuchen mit Menschen, die gegen Bauteile prallten, erarbeitet.

In Kapitel 5 folgt eine Diskussion des Konzepts mit folgenden Fragestellungen: „Bildet der Stoßkörper den menschlichen Anprall realistisch ab“. „Ist die geforderte Basisenergie ausreichend“ oder bildet die Energie auch „besondere Anprallsituationen“ ab. Von den TRAV sind die Stoßkörperfallhöhen zum Nachweis der Absturzsicherung vorgegeben. Sie werden jedoch häufig kritisiert, da sie nach dem „Bauchgefühl“ vieler Planer für überzogen gehalten werden. Ein Bauteilversuch liefert keine Aussage darüber, welchen Anteil der Lageenergie des ausgelenkten Pendels in die Glastafel übertragen wird. Auch diese Frage lässt sich mit den vorgestellten rechnerischen Simulationen klären.

4.2 Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept

Im nachfolgend dargestellten semiprobabilistischen Bemessungskonzept werden zur Kompensierung tragfähigkeitsmindernder Einflüsse wie Werkstoffstreuungen, Montagefehlern, streuender Einwirkungen usw. spezifische Teilsicherheitsfaktoren berücksichtigt. Damit lässt sich ein einheitliches Sicherheitsniveau für unterschiedliche absturzhemmende Glastafeln gewährleisten. Situationsbezogen lassen sich die tatsächlich erforderlichen Faktoren wählen, um die Absturzhemmung einer Glastafel für Menschenanprall nachzuweisen.

Für ein hochwertiges Bauprodukt mit geringen Festigkeitsstreuungen und überwachtem Einbau in einem schmalen Flur ist eine geringere Prüfenergie gerechtfertigt als z. B. für eine unfachmännisch eingebaute Glastafel in einer Fußgängerzone, die auch einem anprallenden Randfahrer ausgesetzt sein kann. Stehen einzelne Teilsicherheitsfaktoren zur Verfügung, welche die streuenden Einflüsse berücksichtigen, können diese situationsbezogen gewählt werden.

Alle zu berücksichtigenden Faktoren erhöhen die charakteristische Energie, abgegrenzt wird gegen die charakteristische Werkstofffestigkeit.

4.2.1 Charakteristische Einwirkung infolge des Menschenanpralls

Einwirkungen auf absturzsichernde Bauteile hängen vom zugrunde gelegten Anprallszenario ab und sind in ihrer Höhe nicht begrenzt. Dem Bemessungskonzept werden Einwirkungen zugrunde gelegt, die bei üblicher Nutzung mit üblichen Wahrscheinlichkeiten nicht überschritten werden. Der statistische Hintergrund und die Aussagewahrscheinlichkeiten sind in den UEAtc nicht dokumentiert. Nach Meinung des Autors kann die geforderte „Basisenergie“ $E_{\text{Basis}} = 100 \text{ Nm}$ als charakteristischer Wert der Einwirkung verwendet werden. Dieser Energiewert hat sich seit Jahren bewährt und ist Stand der Technik bei Bauteilen, die gegen Absturz sichern [ETB 87]. In dieser Arbeit sind zahlreiche Versuche und Vergleiche zum Menschenanprall aufgeführt, die zur Beurteilung und Einschätzung der Höhe des charakteristischen Wertes helfen. Im Bauwesen ist es üblich, charakteristische Einwirkungen, die mit geringen Wahrscheinlichkeiten überschritten werden können, als Bemessungsgrundlage heranzuziehen. Zur besserern Einschätzung wird auf [Pr 04] verwiesen. Darin ist eine umfas-

sende Abhandlung über die Risiken zusammengestellt, denen wir im täglichen Leben und der technischen Welt ausgesetzt sind. So kann es unwahrscheinliche Situationen geben, bei denen auch die charakteristische Energie überschritten wird – was hinnehmbar ist, da wirtschaftliche Konstruktionen nicht jedes Extrem abdecken können und müssen.

4.2.2 Charakteristische Werkstoffeigenschaften bei Stoßeinwirkung

Der dynamische Elastizitätsmodul für Einscheiben-Sicherheitsglas bei Anprall eines Pendels nach DIN EN 12600 wurde im Rahmen der vorliegende Arbeit aus Versuchsergebnissen mit einer Größe von 100.000 N/mm² abgeschätzt (siehe Kapitel 3.9.1).

Bei Verbund-Sicherheitsglas werden vereinfachend die Werkstoffparameter angenommen, die in den TRAV vorgegeben werden. Es kann eine Ersatzsteifigkeit der Verbundglastafel angesetzt werden, die sich aus der Summe der Tafeldicken, dem statischen Elastizitätsmodul des Glases von 70.000 N/mm² und vollem Schubverbund ergibt.

Die in Tabelle 4.1 angegebenen „zulässige Biegespannungen“ für Glas bei Stoßeinwirkung sind charakteristische Werte (Hinweise siehe Kapitel 2.5.1.1). Diese Werte wurden aus theoretischen Überlegungen in [Rü 02a] und [Sc 01] für Glas mit einem Elastizitätsmodul von 70.000 N/mm² abgeschätzt. Systematische Versuchsreihen, die eventuell einen Ansatz noch höherer Festigkeiten bei Stoßeinwirkung rechtfertigen würden, besonders unter Berücksichtigung des dynamischen Elastizitätsmoduls, wurden bisher nicht durchgeführt. Für den im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten Bemessungsvorschlag werden zunächst die genannten quasistatischen Festigkeitswerte als charakteristische Werte angesehen.

Tabelle 4.1: Bemessungswert der Widerstandsgröße: Biegezugfestigkeit von Glas unter Stoßeinwirkung

Werkstoffkennwert	Einheit	SPG	TVG	ESG
Bemessungswert der Biegezugspannung	[N/mm ²]	80	120	170
		$\sigma_{R,d,SPG,Sto\beta}$	$\sigma_{R,d,TVG,Sto\beta}$	$\sigma_{R,d,ESG,Sto\beta}$

4.2.3 Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen, Werkstoff- und Fertigungsstreuungen

Zum Nachweis einer Absturzsicherung gilt der Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkung bauprodukt- und bauartübergreifend. Beim Menschenanprall handelt es sich um eine außergewöhnliche Einwirkung (Unfall). Diese außergewöhnliche Einwirkung wird nach Abschnitt 6 oder Abschnitt 6.4 der TRAV ohne zusätzlichen Ansatz weiterer Einwirkungen betrachtet, der Teilsicherheitsbeiwert für außergewöhnliche Einwirkungen des Anpralls beträgt: $\gamma_F = 1,0$.

Nach den Vorgaben der GRUSIBAU wird mit der Wahl der „Materialsicherheitsbeiwerte“ ein einheitliches Sicherheitsniveau garantiert. Das heißt, an jeder Stelle im Gebäude sollte der Nutzer mit der gleichen Wahrscheinlichkeit vor dem Versagen eines Bauteils geschützt sein. Gemäß den UEAtc sind für absturzhemmende Bauteile, die in Tabelle 2.1 genannten Sicherheitsbeiwerte anzusetzen. In Kapitel 2.5.1.4 wurden Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchun-

gen in Bezug auf die Streuung der Werkstofffestigkeiten ausgewertet. Sie bilden die Eingangswerte in Tabelle 2.1, mit der die erforderlichen Sicherheitsbeiwerte berechnet werden.

Die erforderliche charakteristische Energie zum Nachweis einer Absturzhemmung von Glasbauteilen muss ausgehend von der Basisenergie gemäß den UEAtc mit einem Faktor für die Werkstoffstreuung erhöht werden.

Bei normalen Laufgeschwindigkeiten bis 5,0 m/s ist keine Erhöhung der charakteristischen Energie erforderlich. Simulationen von Dummyanprall gegen Glastafeln, die für diese Arbeit durchgeführt wurden, belegen, dass bei Laufgeschwindigkeiten über 5,0 m/s deutlich mehr Energie auf die Glastafel übertragen wird. Ein Anhalt für den anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwert γ_V kann Abschnitt 5.4.5 entnommen werden.

4.2.4 Bemessungswert der Einwirkungen

Der Bemessungswert der Einwirkungen berechnet sich nach Gleichung (4.1)

$$E_{d,aG} = \gamma_F \cdot \gamma_M \cdot \gamma_V \cdot E_{Basis} \quad (4.1)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
$E_{d,aG}$	Bemessungswert der einwirkenden Prüfenergie (Erforderliche Prüfenergie für absturzhemmende Glastafeln)	[Nm]
E_{Basis}	charakteristischer Wert der Energie, die beim Anprall eines Menschen auf ein Bauteil übertragen wird	[Nmm]
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert des Werkstoffs berücksichtigt Streuungen vom Werkstoff und der Herstellungsqualität	[-]
γ_V	Teilsicherheitsbeiwert beim Menschenanprall mit Laufgeschwindigkeit über 5,0 m/s, nach Abschnitt 5.4.5.	[-]
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkungen $\gamma_F = 1,0$	[-]

Für Glasarten oder Produktionschargen mit unterschiedlichen Variationskoeffizienten, z. B. für teilvorgespanntes Glas mit einem Variationskoeffizienten von etwa 14 %, können die zugehörigen Einwirkungen nach Bild 4.1 gewählt werden. Mit einem Variationskoeffizienten von 26 % für Spiegelglas, nach Anhang A 12, wird aus Tabelle 2.1 ein Faktor γ_M zur Kompensierung der Streuungen der Werkstofffestigkeit ermittelt. Bemessungswerte der Einwirkung für Spiegelglas sind exemplarisch in Tabelle 4.2 aufgestellt. Die erforderlichen Größenordnungen der Faktoren sind von den [UEAtc 82] für einige Streuungen vorgegeben. Die Faktoren für Zwischenwerte werden für diese Arbeit linear interpoliert und sind in Bild 4.1 dargestellt. An den von den [UEAtc 82] vorgegebenen Faktoren fällt auf, dass mit zunehmender Streuung und damit höherer Unsicherheit für streuende Werkstoffkennwerte (Bild 4.1, Kurve b) oder zusätzlich noch Fertigungsstreuungen (Bild 4.1, Kurve a) die relativen Zuwächse unterproportional zunehmen. Nach Gleichung (5.5), [DIBt 86] lassen sich - abhängig

von dem Variationskoeffizienten des Werkstoffs - Materialsicherheitsbeiwerte berechnen (Bild 4.1, Kurve c) die in der gleichen Größenordnung liegen aber überproportional zunehmen. Mit dem gleichen Faktor für Fertigungsstreuungen wie in den [UEATc 82] ergibt sich Kurve d in Bild 4.1.

Untersuchungen über die Höhe streuender Bauqualitäten sind nicht bekannt. Kann keine besonders güteüberwachte Fertigung und Montage der Konstruktion garantiert werden, wird der maximale Faktor zur Erhöhung für streuende Werkstoffeigenschaften empfohlen. Der Aufwand einer zusätzlichen Überwachung z. B. durch einen Prüfeningenieur oder einer akkreditierten Prüfstelle rechtfertigt es, den Erhöhungsfaktor zu verringern. Dies führt, ausgehend von der für den Menschenanprall charakteristischen Einwirkung (Basisenergie) nach [UEATc 82], zu den in Tabelle 4.2 zusammengestellten Bemessungswerten der Energie zum rechnerischen Nacheis einer absturzhemmenden Glastafel aus Spiegelglas. Für verschiedene Fertigungsqualitäten sind die einzelnen Anteile graphisch in Bild 4.2 und Bild 4.3 dargestellt. Bei rechnerischen Untersuchungen ergibt sich der Faktor α aus Gleichung (2.1) zu 1,0 - da die eingebrachte Energie nach der Berechnung kontrolliert und ggf. gesteigert wird.

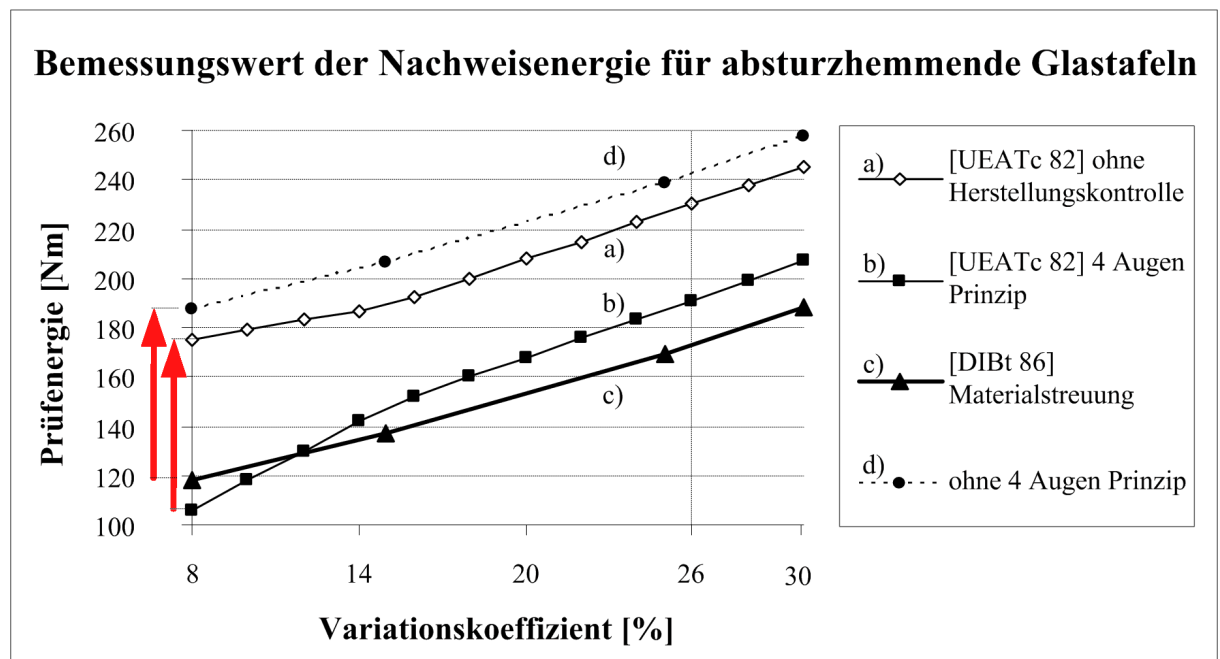


Bild 4.1: Bemessungswert der Nachweisenergie für verschiedene Variationskoeffizienten und unterschiedliche Herstellungsqualität²⁴

²⁴ Die Herstellungsqualität darf sich nicht nur auf die Produktion des Werkstoffs beziehen. Soll auf den Sicherheitszuschlag infolge „überwachter Herstellung“ verzichtet werden, so ist auch der Einbau und die Ausführung einer absturzhemmenden Glaskonstruktion zu überwachen.

Tabelle 4.2: Bemessungswert der Energie zum rechnerischen Nachweis einer absturzhemmenden Glastafel

Erforderliche Energie zum rechnerischen Nachweis einer Absturzhemmung gemäß der UEAtc, übertragen auf Glasbauteile aus Spiegelglas	
$E_{d,aG}$ [J]	Bemerkung
191	Überwachte Fertigung und kontrollierte Montage „Vier-Augen-Prinzip“
230	Übliche Fertigung und Montage

Anteile der Nachweisenergie [%] SPG - überwachte Ausführung

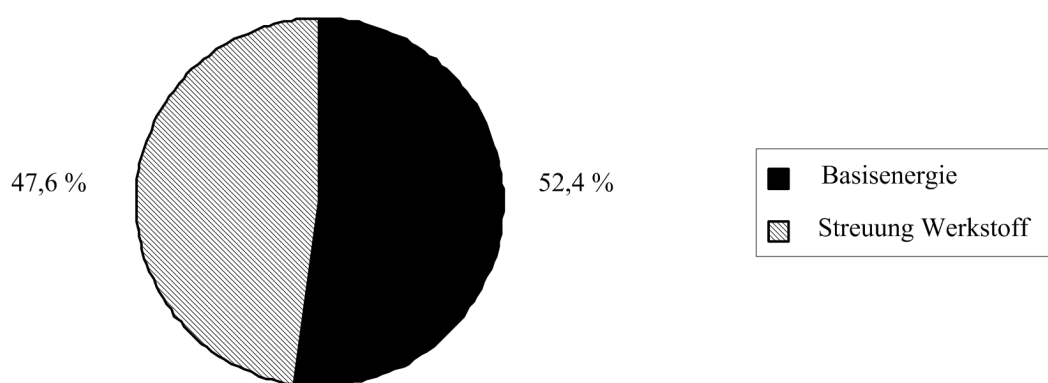


Bild 4.2: Zusammensetzung der Nachweisenergie bei SPG und überwachter Herstellung

Anteile der Nachweisenergie [%] SPG - konventionelle Herstellung

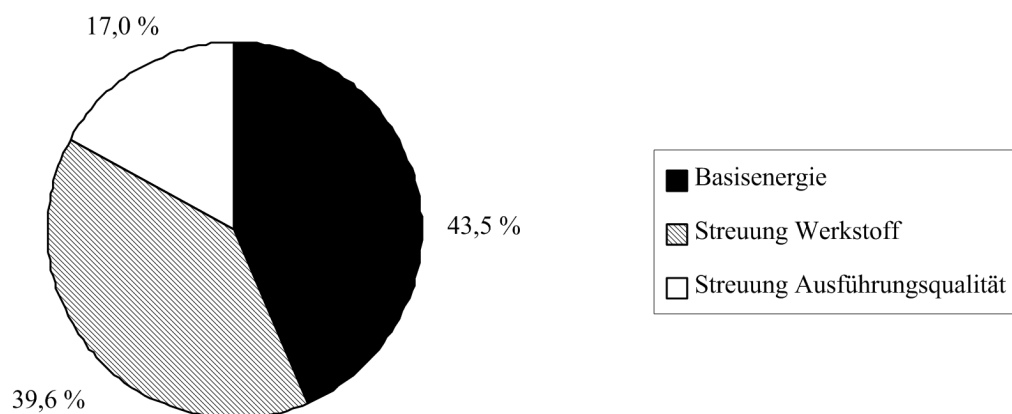


Bild 4.3: Zusammensetzung der Nachweisenergie bei SPG und konventioneller Ausführung

4.2.5 Bemessungswert der Widerstandsgröße

Die Sicherheit einer absturzsichernden Konstruktion ist umgekehrt proportional zur Versagenswahrscheinlichkeit, mit der der betrachtete Grenzzustand erreicht wird. Als Grenzzustände für absturzhemmende Glastafeln werden das Durchschlagen eines Stoßkörpers (Person oder Gegenstand), Splitterabgang auf Verkehrsflächen oder ein Totalversagen von Konstruktionsteilen definiert. Der Splitterabgang ist sicher verhindert, da der Werkstoff beim rechnerischen Nachweis nur linear-elastisch bis zum Bruch ausgenutzt wird.

Nach DIN 1055-100 ist beim außergewöhnlichen Lastfall „Menschenanprall“ kein Materialsi-cherheitsbeiwert wegen Werkstoffstreuungen zu berücksichtigen. Die charakteristischen Werte der Biegezugspannung nach Abschnitt 4.2.5 sind damit die Bemessungswerte der Widerstandsgröße für die entsprechende Glasart, vergleiche Tabelle 4.1.

4.2.6 Erfahrungen aus der Baupraxis

Die Erfahrungen aus zahlreichen Pendelschlagversuchen für Bauvorhaben werden genutzt, um sicher zu stellen, dass der neue Bemessungsvorschlag das Sicherheitsniveau der bisherigen Baupraxis bei Absturzsicherungen einhält. Im Rahmen einer Umfrage [Br 04c] wurden gezielt Hinweise und Erfahrungen der Prüfstellen gesammelt. Damit können Schwachstellen von Konstruktionen erkannt und mit Rechenergebnissen verglichen werden. Die wichtigsten Erkenntnisse sind nachfolgend aufgeführt bzw. im Anhang A 13, zusammengestellt. Diese Hinweise können beim Entwurf absturzsichernde Glaskonstruktionen nützlich sein. Ferner wurden für diese Arbeit 125 Prüfberichte von Pendelschlagversuchen ausgewertet. Die These, dass schwere Glastafeln stoßsicher sind, wird in Bild A7 und Bild A8 belegt. Ergänzend wurden mit dem validierten FE – Modell aus SJ MEPLA und den Annahmen: statischer Werkstoffkennwerte, vollem Schubverbund, nichtlinearem Verformungsverhalten und ideal gelenkiger Lagerung der Glastafelkanten die Geometrien der Tabelle im Anhang A 7 berechnet. In keinem Fall lag das Rechenergebnis auf der unsicheren Seite. Die Ergebnisse sind im Anhang A 7, dargestellt. Die hohe Qualität der rechnerischen Nachweismethode des Pendelschlagversuchs ist ersichtlich.

4.3 Rechnerische Beurteilung der Absturzhemmung einer Glastafel – Vorschlag eines Nachweiskonzeptes

Die in die Glastafel zu übertragende Prüfenergie²⁵ wird entsprechend den Vorgaben der UEAtc gewählt und in den Berechnungen kontrolliert. Bauteile nehmen je nach Steifigkeit und Masse (der Masseneinfluss überwiegt) beim Stoß unterschiedliche Anteile der Pendel-energie auf. Wird in der Simulation zu wenig Energie auf die Glastafel übertragen, muss die Prüfenergie gesteigert werden. Überprüft werden die elastisch gespeicherte und die kinetische

²⁵ Als Prüfenergie wird die mit den erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerten erhöhte charakteristische Energie der UEAtc bezeichnet. Sie entspricht dem Bemessungswert der Einwirkung.

Energie der Glastafel. Dieses Vorgehen entspricht dem Prinzip der Energieübertragungsfaktoren, die für verschiedene Masse – Steifigkeitsverhältnisse erarbeitet wurden [St 78]. Die FE – Analysen lassen sich entsprechend auswerten. Der Stoßkörper nach DIN EN 12600 eignet sich zum Nachweis, da er gegenüber dem Anprall eines Menschen kürzere Kontaktzeiten mit dem Glas aufweist und damit konservativere, höhere Einwirkungen erzwingt. Zudem belegen die Ergebnisse aus [Sc 01], die in dieser Arbeit in Bild 5.5 aufbereitet sind, dass die Schultersteifigkeit einzelner Personen durchaus in der Größenordnung der Steifigkeit des Stoßkörpers nach DIN EN 12600 liegen kann. Aufbauend auf den Berechnungsergebnissen des Programms SJ-MEPLA wurde ein Auswertungsalgorithmus in EXCEL programmiert, der aus den Zeit – Beschleunigungsverläufen und Zeit – Kraftverläufen des Stoßkörpers die elastischen und kinetischen Energien der Stoßpartner berechnen kann. Ausgewertete Beispiele sind in Kapitel 4.4 vorgestellt. So kann, für jeden Pendelschlag die auf die Glastafel übertragene Energie, ermittelt werden. Liegt die eingetragene Energie unter der erforderlichen Prüfenergie, ist die Einwirkung entsprechend zu steigern.

Werden die Glasdicken gesteigert, reagieren schwere und träge Bauteile mit geringeren Verformungen und Beschleunigungen, die Trägheitskraft beteiligt sich zunehmend mehr am Kräftegleichgewicht. Will man in diese Bauteile eine definierte Prüfenergie einleiten, müssen die Einwirkungen (Pendelhöhen) deshalb unrealistisch hoch angesetzt werden. Für das vorliegende Nachweiskonzept wird ein einfaches Kriterium erarbeitet, bei dem mit hinreichender Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass die Trägheitskraft maßgeblich dem Menschenanprall entgegenwirkt.

Zunächst beginnt der Nachweis der Absturzhemmung mit der Simulation des Pendelschlags mit einer Fallhöhe von 450 mm. Bei einer nachgiebigen Glastafel entsteht abhängig von der wirksamen Masse und Steifigkeit der Glastafel eine kleinere Stoßkörperreaktionskraft als beim Schlag gegen die ideal starre Wand (F_{Pstarr}). Ausgehend von Versuchserfahrungen mit Glastafeln, die bei Pendelschlagversuchen nicht zerbrochen sind, wird beim vorgestellten Bemessungskonzept davon ausgegangen, dass eine Glastafel dann absturzhemmend wirkt, wenn beim Schlag auf sie die Stoßkörperreaktionskraft einen Wert von über **85 %** der Kraft des Schlages gegen die ideal starre Wand mit gleicher Fallhöhe erreicht (siehe Gleichung (4.2)).

$$F_{Pstoß} \geq 0,85 \cdot F_{Pstarr} \quad (4.2)$$

In Abschnitt 4.3.4 sind zahlreiche Ergebnisse von Pendelschlagversuchen dokumentiert, die belegen, dass Glastafeln mit der Zunahme des Eigengewichtes seltener brechen. Ausgehend von Vergleichsberechnungen an Glastafeln mit einem Gewicht von über 2.000 N, die nicht gebrochen sind, wurde das vorgestellte Kriterium erarbeitet.

4.3.1 Vordimensionierung einer absturzsichernden Glastafel

Die Formeln (4.3) und (4.4) wurden aus den Ergebnissen zahlreicher linearer FE – Berechnungen abgeleitet. Sie sind ein Hilfsmittel, mit dem die Biegezugspannungen in einer rechteckigen, allseitig gelagerten Glastafel infolge einer statischen Holmlast $p_H = 1,0 \text{ kN/m}$ be-

rechnet werden kann. Das Höhen-Breiten-Verhältnis muss bei $\frac{h_g}{b} \geq 2,0$ liegen. Die Last wird in einer Holmhöhe von 1,0 m über Unterkante Glastafel berücksichtigt.

In den nicht dimensionsechten Formeln (4.3) und (4.4) werden die Glastafeldicke t und die Tafelbreite b in Millimeter eingesetzt, die berechnete Hauptzugspannung im Glas σ_1 hat die Einheit N/mm².

- Monolithisches Glas

$$\sigma_1 = \frac{16}{t^2} \cdot (0,0428 \cdot b + 0,354) \quad (4.3)$$

- Verbund-Sicherheitsglas aus zwei gleichdicken Glastafeln

$$\sigma_1 = \frac{16}{t^2} \cdot (0,0214 \cdot b + 0,177) \quad (4.4)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
σ_1	zulässige Biegezugspannung der verwendeten Glasart	[N/mm ²]
b	Glastafelbreite	[mm]
t	Dicke der Einzelscheibe	[mm]

Bei von 1,0 kN/m abweichenden Holmlasten p_H kann die Spannung mit dem Faktor $\frac{p_H}{1,0 \text{ kN/m}}$ skaliert werden.

4.3.2 Ablaufdiagramm zum Bemessungsvorschlag

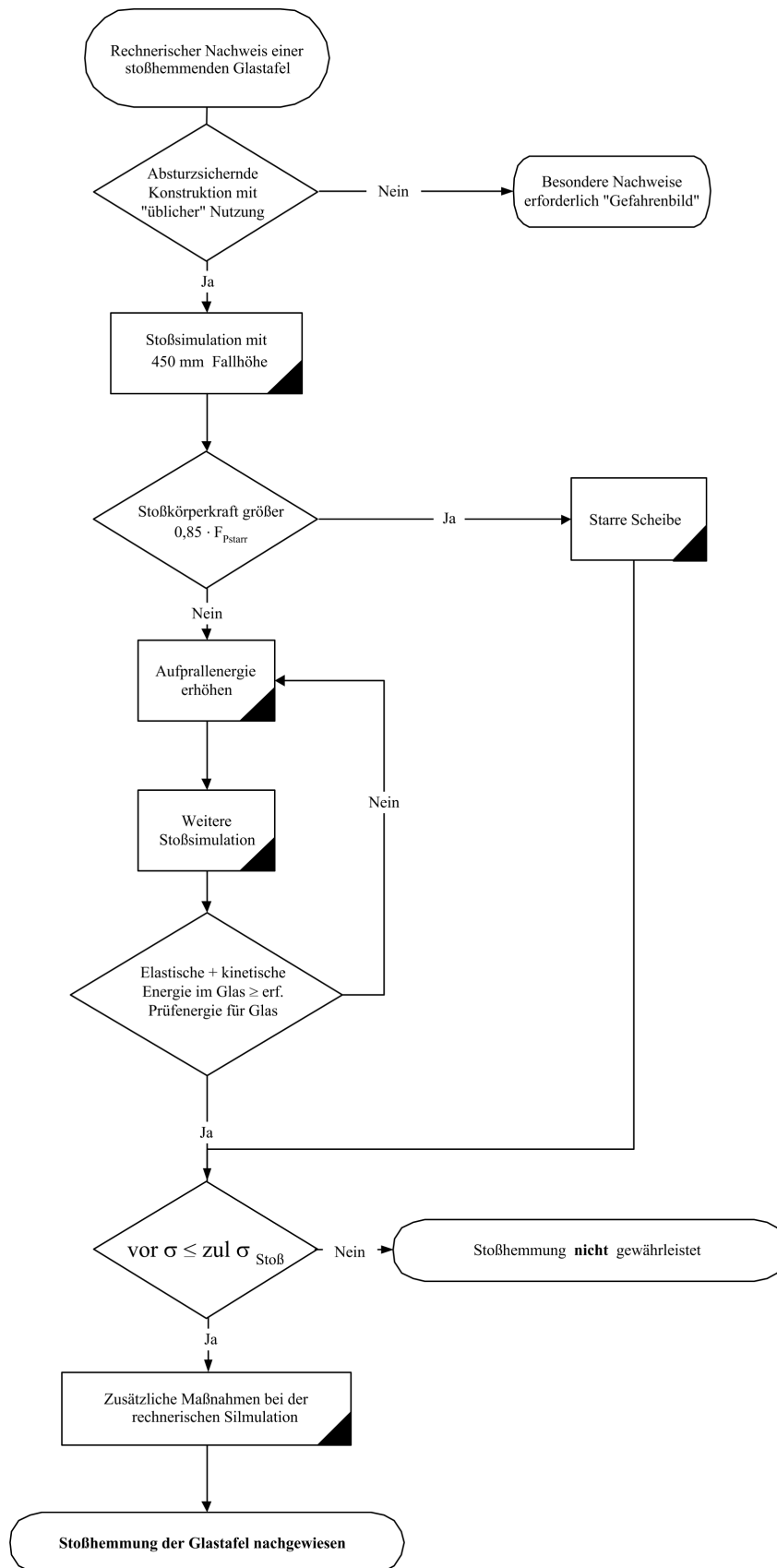


Bild 4.4: Ablauf des rechnerischen Nachweises einer absturzhemmenden Verglasung

4.3.3 Übliche Nutzung - Gefahrenbild

Zunächst muss entschieden werden, ob die Einbausituation der absturzhemmenden Glastafel den Ansatz der üblichen Nutzung in Hochbauten rechtfertigt. Dies wird bei der Mehrzahl aller Situationen im Gebäude so sein. Bei Sondersituationen (Kapitel 5.4.5) sind differenzierte Nachweise erforderlich.

4.3.4 Definition: „leichte“ und „schwere“ Glastafeln

Sichere und wirtschaftliche Glastafeln lassen sich nur rechnerisch nachweisen, wenn das Glastafelgewicht berücksichtigt wird, da mit zunehmendem Gewicht größere Trägheitskräfte wirken. „Leichte“ Glastafeln verformen sich unter Stößeinwirkung stärker und müssen die einwirkende Prüfenergie abtragen.

Übliche raumhohe Glastafeln werden im Rahmen dieser Arbeit in die Kategorie „leichte“ Glastafeln eingruppiert. Nur sehr breite und hohe Glastafeln haben eine entsprechend große Trägheit und werden in dieser Arbeit als „schwer“ bezeichnet. Beim Übergang der gewählten Definition von einer leichten zu einer schweren Glastafel kann es eine Verschiebung der absoluten Sicherheit geben. Ein Sicherheitsrisiko ist das nicht. Zugunsten eines handhabbaren Bemessungsvorschlages wurde diese Vereinfachung bewusst in Kauf genommen.

Ab einem Grenzmassenverhältnis der Stoßpartner wirkt jede Glastafel absturzhemmend. Da bei Pendelschlägen infolge der Massenträgheit Trägheitskräfte in einer Größenordnung hervorgerufen werden, die eine Sicherungsfunktion gewährleisten. Als Gedankenmodell kann ein unendlich schwerer Körper dienen, der reibungsfrei auf einen glatten Untergrund gestellt wird. Er kann keine statisch wirkende Horizontallast abtragen. Einen kurzen Stoß erträgt er jedoch mit ohne Geschwindigkeitszunahme (Energieerhaltungssatz). Es stellt sich ein Kräftegleichgewicht über die D’Alambertsche Trägheitskraft ein. Als Entscheidungskriterium, ob eine Glastafel ausreichend hohe Trägheitskräfte aktivieren kann, wird die berechnete Stoßkörperreaktionskraft gewählt. Überschreitet sie die Größe des gewählten Grenzwertes, nämlich 85 % der maximal möglichen Stoßkörperreaktionskraft beim Stoß gegen die starre Wand, ist die Glastafel immer absturzhemmend. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Glastafel und die Haltekonstruktion die baurechtlich anzusetzende Windeinwirkung abtragen kann. Die aus dem Stoß resultierenden Auflagerkräfte abzüglich der Trägheitskraft der Glastafel beanspruchen die Lager geringer als die statischen Einwirkungen. Dieser grundsätzliche Sachverhalt, dass sich schwere Bauteile gegenüber stoßartigen Einwirkungen gutmütig verhalten, findet sich auch in der ETB-Richtlinie wieder (siehe Tabelle 2.3 für Bauteile über 400 kg).

125 Pendelschlagversuche auf verschiedene Glastafeln aus Verbund-Sicherheitsglas wurden bezüglich der Unterscheidung unversehrt (Bild 4.5) oder gebrochen (Bild 4.6) ausgewertet. Unabhängig von der Lagerung allseitig, punktförmig wurde nur nach der Pendelfallhöhe, der Glasart und dem Glasgewicht ausgewertet. Die Anzahl der gebrochenen bzw. intakten Glastafeln wurde in Gewichtsklassen bis 1.000 N, zwischen 1.000 N und 2.000 N, zwischen 2.000 N und 3.000 N sowie über 3.000 N eingeteilt. Das Ergebnis ist in Bild 4.7 dargestellt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass schwere große Glastafeln beim Pendelschlag seltener

brechen. Die Mittelwerte der Glasgewichte und der Unterscheidung intakt oder gebrochen, sind in der Tabelle 4.3 dargestellt:

Tabelle 4.3: Versuchserfahrung, gebrochene und intakte Glastafeln

Versuchsanzahl	Mittelwert des Glasgewichts [N]	Versuchsausgang
90	1.187	Glas intakt
35	848	Glas gebrochen

Tafeln mit über 2.000 N Glasgewicht sind lediglich beim Anschlagen in Lagernähe im Eckbereich oder an der Scheibenkante gebrochen. Hier prallte der Stoßkörper jeweils gegen die steifsten Tafelbereiche. Aufbauend auf diesen Erfahrungen (siehe auch Anhang A 9) und den Erkenntnissen aus den FE – Berechnungen der Pendelschlagversuche wird abgeschätzt, dass eine Glastafel dann absturzhemmend wirkt, wenn in der Simulation des Pendelschlages eine Größe der Stoßkörperkraft 85 % der Maximalkraft beim Schlag gegen die starre Wand erreicht. Als Grenzwert wird $0,85 \cdot 13,2 \text{ kN} = 11,2 \text{ kN}$ gewählt.

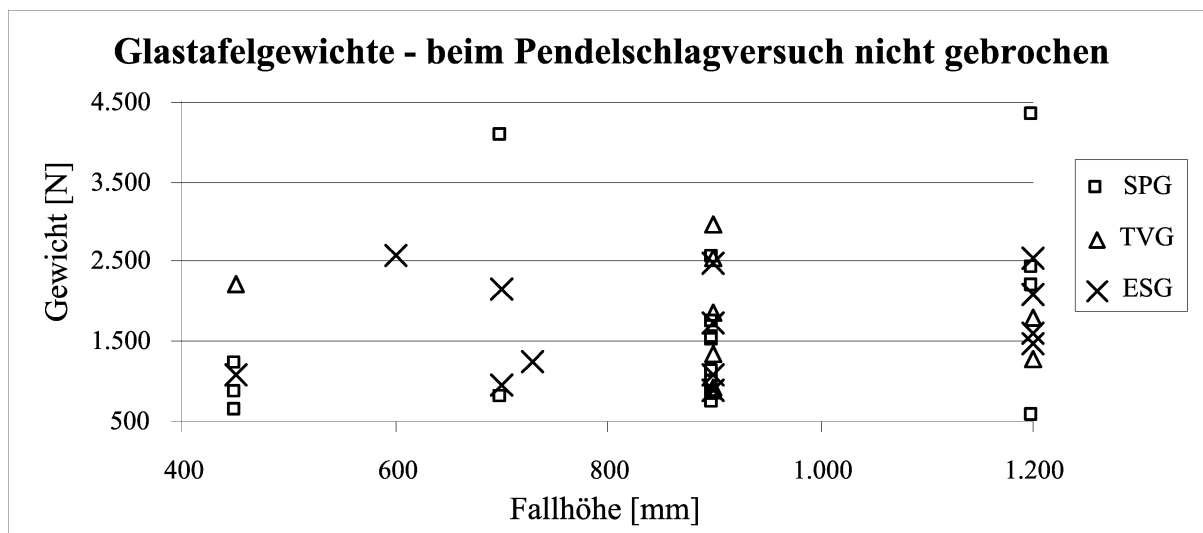


Bild 4.5: Gewichte von Glastafeln, die beim Pendelschlag nicht gebrochen sind

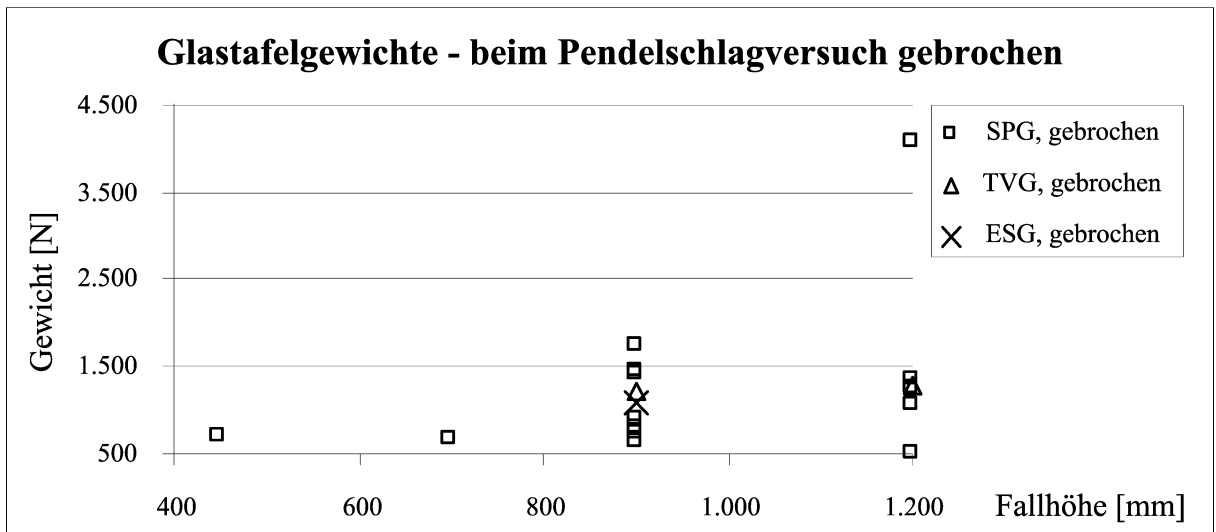


Bild 4.6: Gewichte von Glastafeln, die beim Pendelschlag gebrochen sind

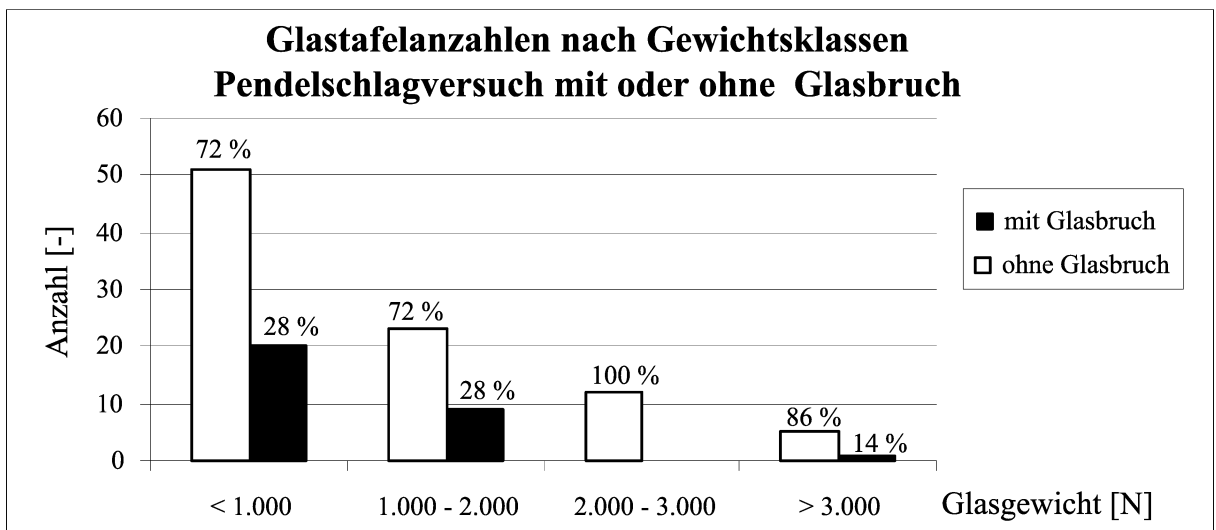


Bild 4.7: Anzahl gebrochener und ungebrochener Glastafeln

4.3.5 Spannungsnachweise und Überprüfung der Lagesicherung

Bei zunehmend weichen Systemen verlängert sich die Kontaktzeit der Stoßpartner. In Extremfällen wird die Glastafel durch den Stoßkörper beschleunigt und verliert kurzzeitig den Kontakt mit ihm. Die maximale Beanspruchung kann dann während einer späteren Kontaktphase auftreten. Die Hauptbeanspruchungsphase folgt zwar immer direkt auf den Anprall. Der Maximalwert kann auch mit Schwingungen erreicht werden (Bild 3.57). Die Berechnungsdauer bei der transienten Analyse muss dann ausreichend lang gewählt werden. Es ist zweckmäßig, die Verläufe der Spannungen und Kräfte zu kontrollieren. Sind deren Werte nahezu abgeklungen, wurde das bemessungsrelevante Maximum berücksichtigt.

Wird mindestens die erforderliche Prüfenergie auf die Glastafel übertragen, und liegen die Biegezugspannungen noch unter den in Tabelle 3 gegebenen Bruchspannungen, so ist die Glastafel unter der Stoßeinwirkung tragsicher. Es sind Stoßkörper zu verwenden, die aufgrund

Ihrer Eigenschaften eine Kontaktzeit mit dem Glas aufweisen, die in der Größenordnung des Menschenanpralls (siehe Kapitel 5.2.7) liegen. Wird die Schlageinwirkung sehr langsam aufgebracht, reduzieren sich die dynamischen Effekte wie Schwingungen und Trägheitskräfte. Stoßkörper mit den Eigenschaften nach DIN EN 12600 sind zur Simulation des Menschenanpralls grundsätzlich geeignet.

Nach der Stoßsimulation und dem Nachweis der Beanspruchungen im Glas, muss der Glaseinstand im Lager nachgewiesen werden. Dies kann für zweiseitig gelagerte Glastafeln nach Gleichung (4.5) erfolgen. Als Verformungsfigur liegt hierbei ein Kreisabschnitt zugrunde. Bei allseitiger Lagerung erfolgt der vereinfachende Nachweis analog für die kurze Seite. Die Tafelverkürzung kann genauer über die Biegelinienlänge berechnet werden. Diese kann unter der vorgegebenen maximalen Verschiebung iterativ an die Tafellänge angepasst werden. Der hiermit verbundene Aufwand ist für baupraktische Fälle nicht erforderlich, da der sich ergebende Unterschied klein ist.

$$\Delta l = 2,5 \cdot w_{pk}^2 \cdot \frac{1}{l} \quad (4.5)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
l	Spannweite	[mm]
w _{pk}	Verformung der Glastafel unter Stoßeinwirkung	[mm]
Δl	Sehnenverkürzung	[mm]

4.3.6 Zusätzliche Maßnahmen: „Erfahrungslücke“ beim rechnerischen Nachweis

Der rechnerische Nachweis der Tragfähigkeit einer Glastafel unter Anpralllasten ist bisher nicht Stand der Technik. Die vorliegende Arbeit zeigt Parameter auf, die das Rechenergebnis maßgeblich beeinflussen. Ohne deren Kenntnis sind Fehlschlüsse aus den Rechenergebnissen möglich. In [Ma 00] wurde auf die Erfahrungslücke beim rechnerischen Nachweis hingewiesen. Es bietet sich an, diese durch zusätzliche Maßnahmen zu kompensieren. Dazu ist es erforderlich, neben der Einwirkung die entsprechende Nachweisform, die erforderliche Werkstoffgüte und die Bauüberwachung ganzheitlich zu betrachten. So dürfen nur robuste Konstruktionen aus mindestens einer Verbund-Sicherheitsglastafel verwendet werden. Für jede Glastafel, an der direkter Personenkontakt möglich ist, sollten Gläser mit geringem Schnitttrisiko (VSG oder ESG) verwendet werden. Die Forderung der [TRAV 03], mindestens ein Verbund-Sicherheitsglas zu verwenden ist sinnvoll. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Person einen harten Gegenstand mitführt und mit diesem anprallt und das Glas schädigt, bevor die Glastafel die Einwirkung aus dem Menschenanprall abträgt. Allerdings ist dieses Szenario wesentlich weniger häufig als der Anprall eines Menschen ohne harten Gegenstand und wird hier nicht weiter untersucht.

Das vorgeschlagene Bemessungskonzept geht von intakten Glastafeln aus, da die nachzuweisenden Beanspruchungen unterhalb den Bruchspannungen liegen müssen. Damit ist ein

Schutz darunter liegender Verkehrsflächen gewährleistet. Wenn Stöße mit Gegenständen nicht ausgeschlossen werden können, ist es immer sinnvoll über Verkehrsflächen splitterbindendes Verbund-Sicherheitsglas anzuordnen. Bei zweiseitiger Lagerung ist die Glastafel in diesem Fall zusätzlich oben mit mechanischen Nothaltern (Bohrung mit Schraube oder Bolzen) zu sichern.

4.3.6.1 Überwachung auf der Baustelle vor dem Einbau der Glastafeln

Eine von unabhängiger Stelle überprüfte Bauausführung rechtfertigt ein reduziertes Prüfscenario (Tabelle 4.2). Eine qualitativ hochwertige Bauausführung ist die Grundvoraussetzung für das einzuhaltende Sicherheitsniveau. Festigkeitsreduzierende Einflüsse infolge Kantenverletzungen, Glas-Stahl-Kontakt, Zwang etc. müssen bei entsprechender Überprüfung nicht mit einem Sicherheitszuschlag auf die Einwirkungen berücksichtigt werden. Solche wirtschaftlichen Konstruktionen müssen jedoch mängelfrei hergestellt werden. Kontrollen eines unabhängigen Prüfers (Vier-Augen-Prinzip) können Fehler, Irrtümer und Abweichungen von den Planungsvorgaben aufdecken. Folgende prinzipiellen Möglichkeiten stehen zur Verfügung:

- Bei der Glaslieferung ist das Übereinstimmungszeichen bezüglich der Glasart zu überprüfen.
- Die Glaskanten können mit einem Finger haptisch hinsichtlich Schäden kontrolliert werden. Abplatzungen und Ausmuschelungen der Kante werden aufgespürt. Optische Kontrollen sind weniger sensibel. Glastafeln mit Kantenschäden, die über dem Grenzwert der TRLV liegen, müssen ausgetauscht werden.
- Vor dem Einbau ist zu kontrollieren, ob die Auflager gesäubert (Mörtelreste, Sand, Späne etc.) wurden.

4.3.6.2 Überwachung nach dem Einbau der Glastafeln

Im eingebauten Zustand sind Lagerungen und Glaskanten häufig unzugänglich. Dennoch lassen sich einige Überprüfungen durchführen, die Montagefehler aufdecken können:

- Die eingebaute Glasart kann durch Anklopfen der Glastafel kontrolliert werden. Ein dumpfer Klang entsteht bei Verbund-Sicherheitsglas, klingt das Glas hell, wurde eine monolithische Tafel eingebaut. In diesem Fall ist ein Schnittschutz des möglicherweise anprallenden Menschen erforderlich – die Verglasung muss aus Einscheiben-Sicherheitsglas gefertigt werden. Der Kontrollstempel „ESG – DIN 1249“ muss eingeprägt sein.
- Die Glasdicke einer eingebauten Glastafel kann über eine Spiegelung eines Messstreifens kontrolliert werden (siehe Anhang A 11).
- Die Verglasungen müssen ohne Zwang eingebaut sein. Sind die Glastafeln wellig (siehe Bezugsgerade in Bild 4.8) oder treten ungleichmäßige Spiegelungen auf, wurden die Glastafeln unter Zwang eingebaut. Wellige Pressleisten deuten auf ungleichmäßig angezogene Schrauben hin. Hebt die Glastafel nach dem Lösen eines Lagers vom Auflager ab, wurde Sie mit Zwang montiert. In der rechnerischen Simulation können solche zusätzlichen Zwangsbeanspruchungen im Rechenmodell abgebildet und berücksichtigt werden.

- Zugängliche Glaskanten sind visuell oder durch ein Abtasten (Schnittgefahr) auf Schäden hin zu überprüfen.
- Glas-Stahl-Kontakt kann visuell kontrolliert werden. Zwischen Glas und Glas oder Glas und anderen harten Gegenständen müssen elastische Trennschichten eingebaut sein.
- Die elastischen Eigenschaften der Zwischenschichten kontrolliert man mit Druckversuchen (Bleistift).
- Die glashaltenden Schrauben sind dauerhaft gegen Lösen zu sichern. Es ist zu kontrollieren, ob Schraubensicherungssysteme verwendet wurden.
- Eine abschließende Kontrolle, ob alle Bauprodukte (z. B. Schrauben) eingebaut wurden, ist unbedingt erforderlich. Die vorgesehenen Schrauben in der Fußplatte in Bild 4.9 fehlen. Der eingezeichnete Pfeil deutet auf ein Blatt Papier, das unter die nicht befestigte Pfostenfußplatte geschoben werden konnte. Dieses Konstruktionsprinzip der Fußplatte führt zu hohen Dübelzugbeanspruchungen, die wegen der randnahen Lage im Massivbau häufig nicht abgeleitet werden können.



Bild 4.8: Welligkeit deutet auf unter Zwang eingebaute Glastafeln hin



Bild 4.9: Pfostenbefestigung mit "undefinierter" Tragfähigkeit, Schrauben fehlen

Foto: H. Winkler

4.3.7 Bemessung der Unterkonstruktion

Werden die Beanspruchungen der Schrauben zwischen Trag- und Deckprofil oder die Befestigungselemente (Dübel) des Fensterrahmens am Massivbau nicht im Rahmen der Berech-

nung ermittelt, sind zum Nachweis der Tragfähigkeit jedes Befestigungsmittels eine Zugkraft von 2,8 kN anzusetzen (siehe TRAV und ETB-Richtlinie).

Bei Pressleistensystemen ist es konstruktiv sinnvoll, am Ende der Pressleisten einen kleineren Schraubenabstand zu wählen. Die infolge abhebender Plattenecken entstehenden Kräfte (entgegen der Stoßrichtung) können dann von den Pressleisten sicherer abgetragen werden.

4.4 Berechnungsbeispiele

In den folgenden Beispielen zum vorgestellten Konzept wird die Verteilung der elastischen und kinetischen Energien bei einigen Glastafeln unter Stoßeinwirkung ausgewertet. Dem Autor lagen keine aussagekräftigen Untersuchungen über den Variationskoeffizienten der Biegezugfestigkeit von ESG vor. Eine Auswertung von fünf Vierpunktbiegeversuchen deutet darauf hin, dass die Biegezugfestigkeiten vorgespannter Glasarten weniger streuen als diejenigen von SPG. Liegen verlässliche Werte zur produzierten Glascharge vor, kann der Teilsicherheitsbeiwert nach Bild 4.1 festgelegt werden. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden wird in dieser Arbeit der Teilsicherheitsbeiwert für alle Glasarten für den ungünstigsten Fall SPG gewählt. Mit dem Bemessungswert der Einwirkungen nach Abschnitt 5.2.7 werden folgende Aufbauten untersucht:

- Starre Wand
- Allseitig gelagerte rechteckige Glastafel mit den Abmessungen:
 - 8 mm x 1.050 mm x 2.056 mm
 - 2 x 5 mm x 1.000 mm x 2.000 mm
 - 10 mm x 1.500 mm x 3.000 mm
 - 12 mm x 3.200 mm x 6.000 mm

Die Berechnungsergebnisse sind im Anhang A 15 dokumentiert.

Der Pendelschlagversuch den die [TRAV 03] fordern, muss die am Bau üblichen Unwägbarkeiten abdecken und sichere Konstruktionen gewährleisten. Die dargestellten Beispiele belegen, dass es gerechtfertigt ist, bei gewissen Konstruktionen die Einwirkungen zu reduzieren. Allerdings ist dies nur rechnerisch möglich, da nur hier die tatsächlich in die Glastafel eingetragene Energie ausgewertet werden kann. Mit einem pauschalen Abschlag der Fallhöhe kann kein einheitliches Sicherheitsniveau zum Nachweis absturzhemmender Glastafeln erreicht werden. In den Beispielen A 15.6 und A 15.7 im Anhang A 15 werden Glastafeln mit der maximalen Fallhöhe der [TRAV 03] von 900 mm beaufschlagt und die eingetragene Energie ausgewertet.

4.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde als Bemessungsvorschlag ein rechnerischer Nachweises absturzhemmender Glastafeln vorgestellt. Absturzhemmende Glastafeln können damit zukünftig mit

einem einheitlichen Sicherheitsniveau bemessen werden. Da die Einwirkungen gestaffelt aufgebaut sind, können in Sonderfällen, z. B. einer fremdüberwachten Fertigung, geringere Prüfeinwirkungen gerechtfertigt sein.

Im Abschnitt 4.4 sind exemplarisch einige Glastafeln nach dem Bemessungsvorschlag untersucht worden.

In Kapitel 5 werden Annahmen zum Bemessungsvorschlag mit einem Menschensimulator (Dummy) kontrolliert. Die Dummies wurden zur Kontrolle der Insassensicherheit im Auto beim Seitenanprall entwickelt. In der Simulation der vorliegenden Arbeit prallen Dummies gegen Glastafeln. Die daraus resultierenden Beanspruchungen im Glas und die dabei einwirkende Energie werden ausgewertet. Ein Vergleich zwischen dem Bemessungswert der Einwirkung ($E_{d,aG}$) und der beim Dummyanprall in die Glastafel eingetragene Energie erfolgt. Damit kann bewertet werden, ob der Bemessungswert der Energie ausreichend und realistisch ist.

Werden Konstruktionen mit besonderen Risiken gebaut, z. B. Geländer in Fußballstadien oder Fußgängerzonen, müssen alle Einwirkungen (Szenarien) beim Konstruktionsprozess berücksichtigt werden. Dazu wird in Kapitel 5.4.5 ein Hilfsmittel zur Verfügung gestellt.

5 Menschenanprall gegen vertikale Bauteile

5.1 Allgemeines

"Wird's besser?
Wird's schlimmer?
Fragt man alljährlich.
Seien wir ehrlich:
Leben ist immer
lebensgefährlich.“

Erich Kästner (1899-1974)

Erich Kästners Worte drücken aus, dass es keine absolute Sicherheit geben kann. Dies gilt auch für absturzsichernde Glastafeln.

Die normativen Vorgaben zum Ablauf eines Pendelschlagversuchs und zu den geometrischen Randbedingungen (Fallhöhe, Geometrie etc.) wurden mehrfach geändert, bis die DIN EN 12600 entstand. Aus unbekannten Gründen stand die reale Abbildung des Menschenanpralls nicht im Vordergrund. Ziel war, mit einem einheitlichen Stoßkörper die bisherigen Ergebnisse der unterschiedlichen Stoßkörper möglichst konservativ abzubilden. Die Folgen für den Menschen, der auf ein Glasbauteil prallt, wurden hierbei nicht bewertet.

Nachfolgend wird der Menschenanprall rechnerisch untersucht und bewertet. Die Auswirkungen des Anpralls des Stoßkörpers werden mit denen eines Menschenanpralls verglichen. Charakteristische Einwirkungen für den Menschenanprall auf Glastafeln werden berechnet und vergleichend einem Anprall eines Dummys gegenübergestellt.

Die dargestellten Einwirkungen aus Versuchen belegen, dass die in der UEAtc vorgegebene Prüfenergie ausreichend ist.

Im Folgenden wird das Verletzungsrisiko für den Menschen, der gegen die Glastafel prallt, rechnerisch ermittelt und biomechanischen Grenzwerten gegenübergestellt. Der Menschenanprall auf eine absturzsichernde Glastafel wird rechnerisch mit einem Menschenmodell (Dummy) simuliert (siehe Kapitel 5.4.2 und 0). Damit können charakteristische Kennwerte wie z. B. Beschleunigungen und das daraus resultierende Head – Injury – Criterion (HIC) ermittelt werden. Übersteigt dieser Wert eine biomechanische Grenze ist eine Verletzung wahrscheinlich.

Jedes Anprallszenario auf ein Bauteil kann man sich gedanklich mit beliebig hohen Einwirkungen vorstellen. Realistische Forderungen stellen die Regeln UEAtc auf. Mit den darin geforderten Einwirkungen, die auf Basis statistisch ausgewerteten Versuchsdaten ermittelt

wurden, lassen sich Konstruktionen auf einem einheitlichen Sicherheitsniveau nachweisen. Die daraus ermittelten charakteristischen Einwirkungen sollen mit Erfahrungen anderer Vorschriften, wie z. B. der ETB und rechnerischen Simulationen mit Menschensimulatoren (Dummy) verglichen und bewertet werden.

Der Mensch besteht aus zahlreichen Knochen und Organen (incl. Blut, Haut, Gewebe, Fett usw.). Diese verteilten Massen sind über Muskeln, Bänder und Sehnen zusammengehalten. Diese Verbindungen zeigen ein nichtlineares Steifigkeitsverhalten [Re 93]. Als maßgebende Stoßstelle des Körpers wurde in [St 76] und [Rü 02] die Schulter ermittelt, deren Steifigkeit beim Anprall geschwindigkeitsabhängig ist.

Gliederung des Kapitels:

Der Anprall eines Menschen gegen vertikale Bauteile wird untersucht. In Abschnitt 5.2 werden die maßgebenden Eigenschaften eines anprallenden Menschen betrachtet. Die Steifigkeiten verschiedener Stoßkörper werden Schultersteifigkeit gegenübergestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden mit Ergebnissen verschiedener Untersuchungen verglichen.

Über den Abgleich mit biomechanischen Beanspruchungsgrenzen des Menschen lässt sich das Verletzungsrisiko (siehe Kapitel 5.2.8) beim Anprall an eine Glastafel mit Hilfe der rechnerischen Simulation mit Dummys bewerten.

Es soll hier die Frage beantwortet werden, ob die in Kapitel 4.2.1 dargestellten Einwirkungen tatsächlich ausreichend sind und wie sich der Mensch beim Stoß im Vergleich zum Stoßkörper nach DIN EN 12600 verhält.

5.2 Der Mensch als Stoßkörper

5.2.1 Unfälle an Glasbauteilen

In unseren Nachbarländern werden dünnere Glastafeln zur Absturzsicherung eingesetzt. Seit Jahren sind aber auch hierzulande unzählige absturzsichernde Verglasungen in Altbauten in Verwendung, die den Anforderungen der [TRAV 03] nicht genügen. Über Unfälle, eventuell sogar mit Todesfolge, liegen dennoch keine Meldungen vor [Wi 99].

In [Si 02] sind Schnittverletzungen an Glasbauteilen dokumentiert, die sich Menschen beim Anprall auf Glasbauteile zugezogen haben. Deshalb wird auch in der Schweiz bei Brüstungen ein besonderer Wert auf die Verwendung splitterbindender Glasarten gelegt. Von einem Totalversagen absturzsichernder Glaselemente wird nicht berichtet.

In der Unfallstatistik des österreichischen Institutes „Sicher Leben“ [SL 02] wird Glas als unfallverursachendes Produkt bei Schnitt-Verletzungen geführt. Der Sturz wird als eine häufige Verletzungsursache dargestellt. Im Jahr 2001 waren Stürze, die im Krankenhaus behandelt werden mussten, mit einem Anteil von ca. 60 % die dominierende Unfallart zuhause und in der Freizeit. Über ein Versagen einer absturzsichernden Verglasung infolge eines anprallenden Menschen wird ebenfalls nicht berichtet. In Deutschland ereignen sich nach [BG 91] jährlich etwa 60.000 Unfälle an oder auf Treppen, die bei den Berufsgenossenschaften gemel-

det werden müssen. Bei 2.000 Unfällen ergaben sich bleibende Körperschäden. Hinweise über Anprallhäufigkeiten an Geländer oder Brüstungen oder einem Totalversagen einer Brüstung infolge eines Menschenanpralls sind ebenfalls nicht gegeben.

5.2.2 Unterschiedliche Anprallarten (Stoßpositionen)

Die Stoßprüfung, wie sie die ETB-Richtlinie [ETB 87] fordert, geht auf Arbeiten von Limberger, Struck und anderen [Li 71][St 67][St 71a][Li 72][Li 75] zurück. Über den Mensch als Stoßkörper wurden keine umfassenden Versuchsreihen durchgeführt. In [Go 61] wurden einige Untersuchungen durchgeführt, die als Ergebnis ein „kompliziertes Eigenverhalten“ des menschlichen Körpers als schwingendes System beschreiben. Unter sonst gleichen Umständen – gleiches Massen- zu Steifigkeitsverhältnis des gestoßenen Bauteils mit gleicher Stoßkörpermasse und gleicher Anprallgeschwindigkeit – wächst die Beanspruchung im gestoßenen Bauteil mit wachsender Federkonstante des stoßenden Körpers. Struck hat [St 76] den Schulterstoß untersucht. In [Rü 99a] wurden verschiedene Auftrefforte des Körpers untersucht. Es wurden Schulterstöße, Stöße mit dem Kopf und kombinierte Stöße mit einem etwa gleichzeitigen Anprall von Kopf und Schulter realisiert. Es zeigte sich, dass der Schulterstoß oder der kombinierte Stoß mit gleichzeitigem Anprall von Kopf und Schulter nahezu die gleiche Einwirkung erzeugt. Mit dem Kopf als steifstem Stoßkörper wurde die maximale Einwirkung erzielt. Allerdings ist der reine Kopfanprall für die übliche Nutzung im Bauwesen unrealistisch, da die Person mit dem Kopf voraus horizontal gegen eine Glastafel prallen müsste. Diese Stoßposition wird in den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt.

5.2.3 Laufgeschwindigkeiten des Menschen

Die Laufgeschwindigkeit beeinflusst die Größe der Einwirkung. Situationsbedingt sind verschiedene Laufgeschwindigkeiten möglich. Im Anhang A 2, sind die zu erwarteten Laufgeschwindigkeiten sowie die daraus resultierenden Energien zusammengestellt. Bei einem für das Bauwesen realistischen Szenario (schnelles Laufen eines Nichtsportlers mit einer Masse von 80 kg) ergibt sich eine theoretische Obergrenze der kinetischen Energie mit 1.000 Nm. Werden die wirksamen Massen aus Kapitel 5.2.4 verwendet, sind realistische Prüfenergien entsprechend der Tabelle 4.2 erforderlich.

5.2.4 Wirksame Masse des Menschen

In der UEAtc sind Vorgaben der wirksamen Masse eines Menschen beim Anprall enthalten. Sie sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Beim Anprall wird nicht die gesamte Masse wirksam. Es ist nicht bekannt, wie die in der UEAtc angegebenen Werte ermittelt wurden. Die angegebenen wirksamen Massen des stoßenden Menschen m_{WM} streuen von ca. 30 bis 60 % der Körpermasse. Da der Mensch während des Anpralls Kontakt zum Boden hat und die Gliedmaßen nicht starr am Körper anliegen, wird nur ein Teil der Gesamtmasse stoßwirksam. In baurechtlich eingeführten Regeln wurde mit einem Wert von 60 % gearbeitet.

Tabelle 5.1: Wirksame Masse von anprallenden Menschen

Wirksame Masse m_{WM} bezogen auf das Körpergewicht m_m [%]	Bemerkung, [UEAtc 82]
~ 33	für eine Person, deren Füße den Boden beim Stoß nicht verlassen
~ 56	Anprallende Person steht in erhöhter Position
~ 56	Anprallende Person trägt Lasten

5.2.5 Steifigkeit des Menschen beim Anprall

Zum Menschen als Stoßkörper und die daraus resultierenden Einwirkungen sind bisher wenige Untersuchungen verfügbar. Versuche, bei denen der Mensch als Stoßkörper wirkte, zeigen das komplizierte Eigenverhalten als schwingendes System [Go 61]. Dennoch wurde der anprallende Mensch in erster Näherung als eine Masse idealisiert. Ausgehend von dieser Annahme und den Versuchsergebnissen, bei denen Menschen mit verschiedenen Körperstellen gegen oder auf Bauteile stießen oder prallten, wurde in [Li 72] ein einfaches Masse - Feder - Gedankenmodell des Stoßvorganges vorgestellt. Weiche Konstruktionen können auf dieser Basis durchaus wirtschaftlich bemessen werden, da ein Großteil der Stoßenergie in kinetische Energie umgesetzt wird. Bei einer rein elastischen Ausnutzung ist die Tragfähigkeit der Bauprodukte schnell erreicht, unwirtschaftliche Konstruktionen wären die Folge. Eine Gipskartonwand erleichtert die Vorstellung. Unter rein elastischer Ausnutzung wäre die Tragfähigkeit der Beplankung schnell erreicht und ein Bruch der Platten wäre die Folge. Wird jedoch zusätzlich die plastische Verformungsarbeit der Metallständer berücksichtigt, kann ausreichend Energie dissipiert werden um dem Stoß zu widerstehen.

So entwickelte Limberger (1975) eine „vereinfachte Ermittlung der Beanspruchung von Bauteilen infolge Massestoß unter Berücksichtigung elastisch-plastischen Tragverhaltens“ [Li 75]. Dieser Ansatz kann für Nachweise nach DIN 4103 und die ETB-Richtlinie verwendet werden. Vorgeschlagen wird ein Masse – Feder – System mit einer linear elastischen, ideal plastischen Federkennlinie für das Bauteil. Untersucht wurde der Anprall eines Menschen, der mit einer Teilfläche seines Rumpfes gegen das Bauteil stößt. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Beanspruchung im gestoßenen Bauteil mit wachsender Federkonstante c_M des stoßenden Körpers steigt. Das Massen-Steifigkeitsverhältnis des gestoßenen Bauteils m_{mpk}/c_{pk} , die Stoßkörpermasse m_{sk} und die Anprallgeschwindigkeit v_{a0} waren konstant gehalten.

5.2.5.1 Versuche mit gegenstoßenden Menschen

Im Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Materialforschung [St 76], Abschnitt 2, wurde untersucht, welche Auswirkungen ein Mensch erzeugt, der mit einer Schulter mittig gegen unten und oben abgestützte Wandelemente anprallt. Zwei Stoßarten wurden untersucht:

- Der Mensch steht in der Ausgangsstellung ca. 0,5 m von der Wand entfernt mit gestreckten Beinen und beiden Füßen auf Fußbodenhöhe.
- Der Mensch steht in der Ausgangsstellung ca. 0,5 m von der Wand entfernt etwa 0,16 m erhöht mit angewinkelten Knien.

Die Federkonstante der Menschenschulter hängt beim Stoß gegen Bauteile von der Anprallgeschwindigkeit v_{a0} ab. Keinen Einfluss hat die Steifigkeit des gestoßenen Bauteiles [St 76] Abschnitt 2.3. Diese Aussage basiert auf Versuchen mit Steifigkeiten an der Stoßstelle von ca. 50 bis 1.200 kN/m und wirksamen Massen von ca. 50 bis 450 kg. Daraus resultieren Eigenschwingungsdauern von ca. 0,1 bis 0,25 s. Die Schultersteifigkeit kann für Geschwindigkeiten v_{a0} von ca. 0,4 bis 2,0 m/s als linear angesetzt werden, [St 76] Abschnitt 2.3. Wird aus diesen Messdaten die Federsteifigkeit des Menschen ermittelt, ergibt sich Gleichung (5.1), [St 78], Tabelle 3:

$$c_M = m_{WM} (1144 v_{a0} - 141) \quad (5.1)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
c_M	Steifigkeit ²⁶ des Menschen an der Stoßstelle	[N/mm]
m_{WM}	wirksame Masse des stoßenden Menschen (ca. 60 % der Eigenmasse des Menschen)	[kg]
v_{a0}	Anprallgeschwindigkeit	[m/s]

Die Versuche wurden bis zu einer Auftreffgeschwindigkeit $v_{a0} = 1,85$ m/s durchgeführt. Dabei lagen die Einwirkungen auf den Menschen „... schon an der zumutbaren Schmerzschwelle sowohl für die Schulter als auch für Kopf und Halswirbel ...“ [St 76] Abschnitt 2.4. Wegen der Verletzungsgefahr der Versuchsperson wurden keine experimentellen Untersuchungen mit höheren Anprallgeschwindigkeiten durchgeführt. Für höhere Geschwindigkeiten wird die gleiche lineare Abhängigkeit vermutet. Für 50 kg und $v_{a0} = 2,0$ m/s ergibt sich eine Federkonstante von $c_M = 107.350$ N/m. Das Steifigkeitsverhalten der Schulter wurde an 11 unterschiedlichen Wänden mit jeweils 5 bis 20 Stößen ermittelt. Über die Größe möglicher Streuungen der Ergebnisse sind keine Hinweise enthalten.

5.2.5.2 Gegenüberstellung der Steifigkeiten verschiedener Prüfkörper

Im folgenden Kapitel werden die Steifigkeiten verschiedener Stoßkörper gegenübergestellt. In [Bo 99] wurden die Steifigkeit des Stoßkörpers nach DIN EN 12600 in Abhängigkeit vom Verschiebungsweg aus Pendelschlägen angenähert. [Wö 00a] gibt als Abschätzung eine konstante Steifigkeit an. Die Steifigkeit des Menschen beim Schulterstoß hängt von der Anprallgeschwindigkeit ab [St 78], Tabelle 3. Zusätzlich wurden für einige Personen in [Wö 00a] Steifigkeitswerte berechnet. Die Steifigkeitsbeziehungen der Prüfkörper sind von verschiedenen Einflussfaktoren (Geschwindigkeit, Verschiebung, Kraft) abhängig. Im Folgenden werden diese Steifigkeiten der Stoßkörpersteifigkeit gegenübergestellt.

Die Daten können erst verglichen werden, wenn als einheitliche Bezugsgröße die Kraft gewählt wird. In [Rü 02a], Abschnitt 4.3.2.2 sind Ergebnisse eines statischen Druckversuchs auf

²⁶ Die (nichtlineare) Last-Verformungscharakteristik des Stoß- oder Prüfkörpers wird hier als Steifigkeit (Federsteifigkeit) bezeichnet. Sie ist ein Maß für die elastische Verformbarkeit des Elementes.

einen Stoßkörper nach DIN EN 12600 dokumentiert. Der gemessene Kraft-Steifigkeits-Zusammenhang ist in Bild 5.1 dargestellt.

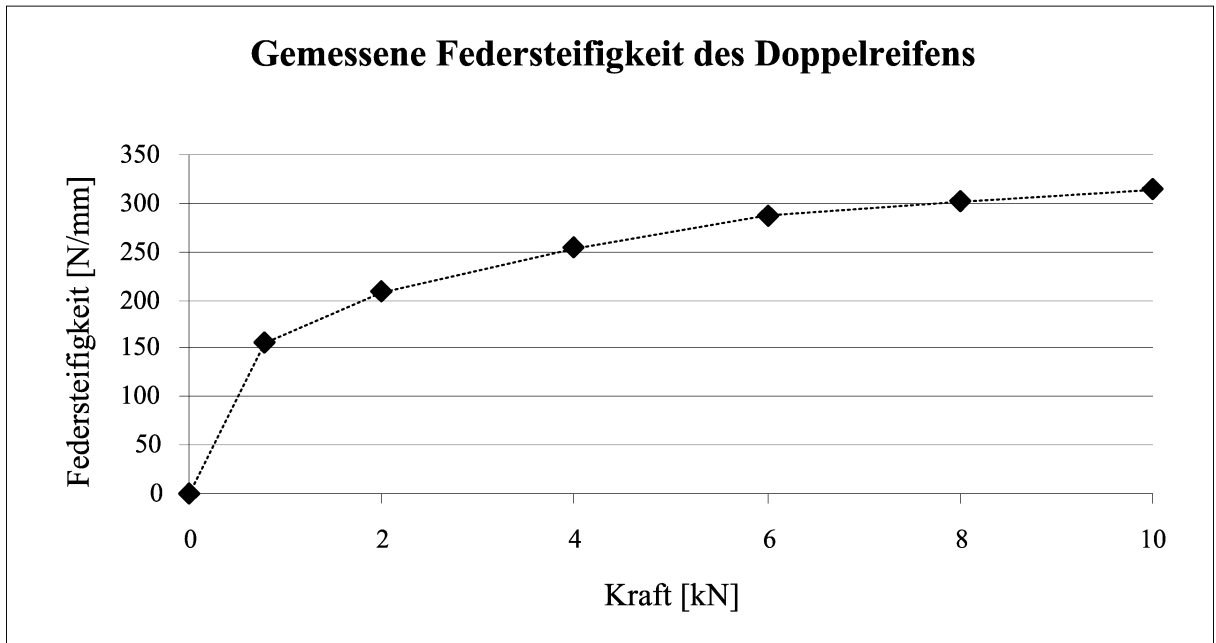


Bild 5.1: Federsteifigkeit des Zwillingsreifens

In [Hu 95] Abschnitt 5.2 sind experimentell ermittelte Stoßkörperkräfte in Abhängigkeit von der Fallhöhe dargestellt. Diese können als Trendkurve nach Bild 5.2 zusammengefasst werden. Es ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Stoßkörperkraft und Fallhöhe:

$$F_{P\text{stoß}} = 20,794 \cdot h^2 - 2,2594 \cdot h + 10,713 \quad (5.2)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
$F_{P\text{stoß}}$	Kraft im Stoßkörper bei Anprall	[N]
h	Fallhöhe	[mm]

Die Gleichung (5.2) ist nicht dimensionsecht rein. Mit der Fallhöhe h in mm wird die Stoßkörperkraft in kN berechnet.

Mit dem bekannten Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Fallhöhe für den Stoßkörper als Massenpunkt und dem in [SJ 01] integrierten nichtlinearen Verformungsverhalten des Pendels (3.6) kann das Steifigkeitsverhalten einheitlich dargestellt werden.

$$v_{sk} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (5.3)$$

Hierin sind:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]

h	Fallhöhe	[mm]
v_{sk}	Geschwindigkeit des Stoßkörpers	[m/s]

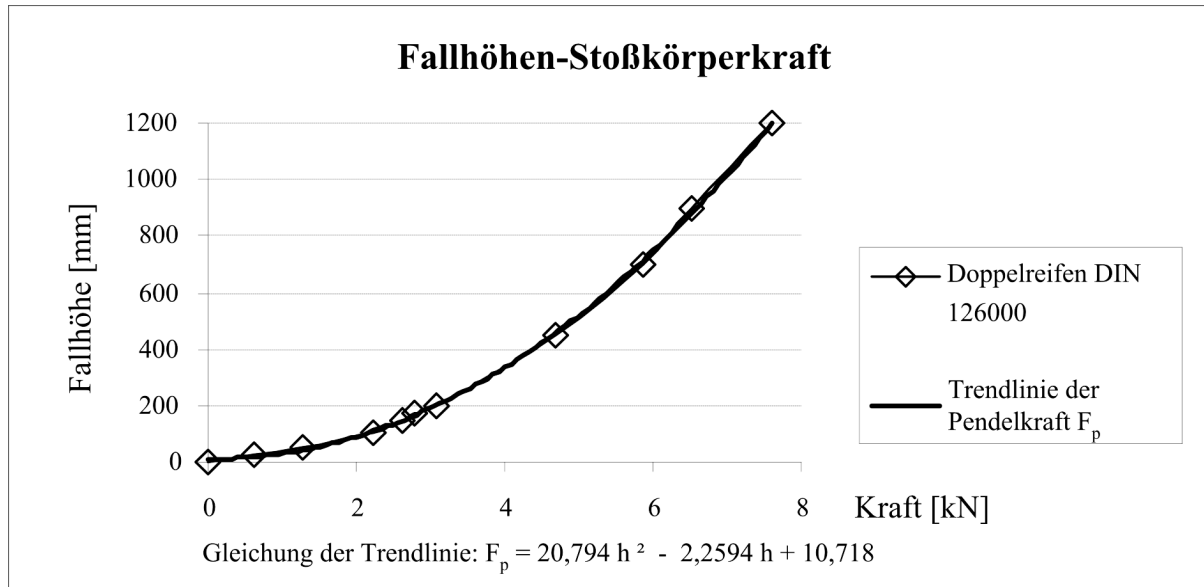


Bild 5.2: Stoßkörperkraft in Abhängigkeit von der Fallhöhe

Für eine angenommene Kraft lässt sich eine Fallhöhe abschätzen, mit der wiederum auf die Anprallgeschwindigkeit zurückgerechnet wird. Damit lassen sich für alle genannten Stoßkörper Wertepaare der Federsteifigkeit in Abhängigkeit von der Kraft berechnen. Das Verformungsverhalten ist in Bild 5.3, die Steifigkeiten in Bild 5.4 zusammengestellt.

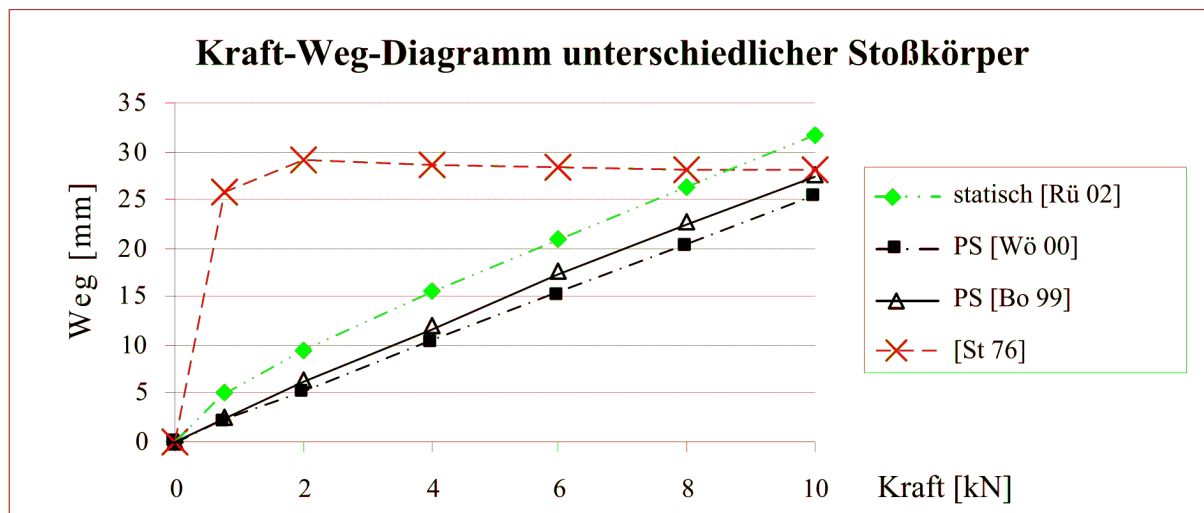


Bild 5.3: Kraft-Weg-Diagramm unterschiedlicher Stoßkörper

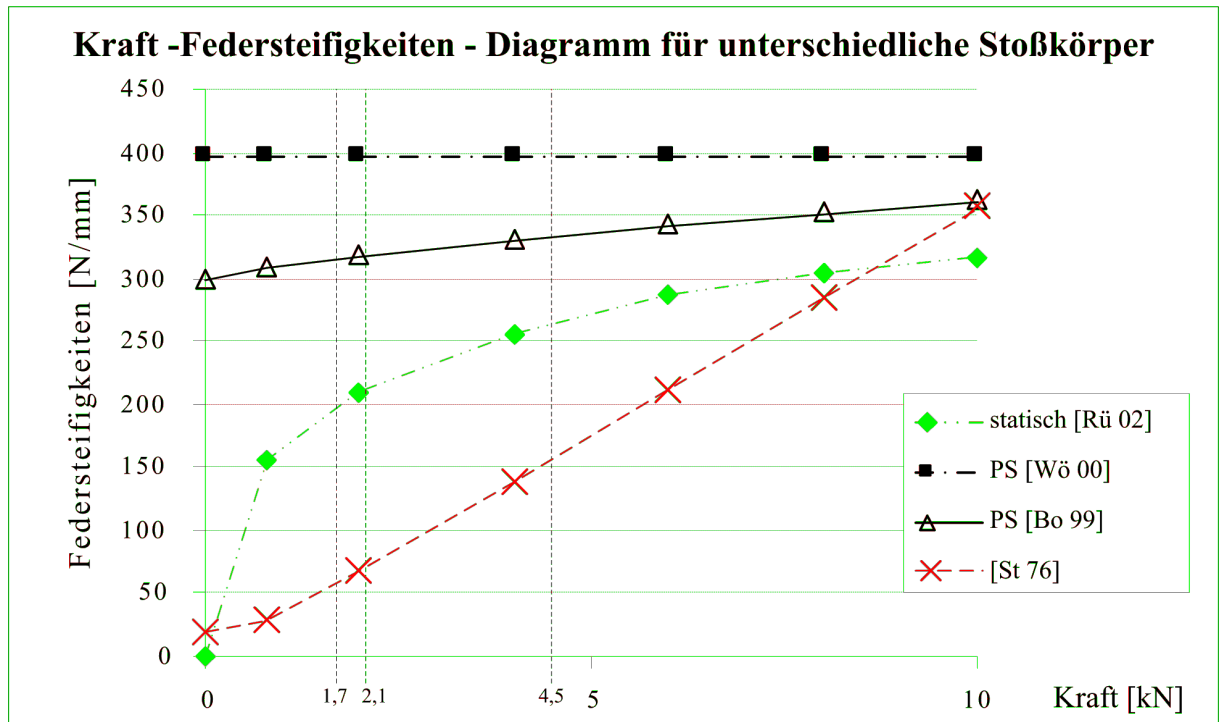


Bild 5.4: Vergleich der Federsteifigkeit unterschiedlicher Stoßkörper

Aus Bild 5.4 wird deutlich, die Steifigkeit der menschlichen Schulter ist deutlich geringer als die Steifigkeit des Doppelreifens. Beim Anprall von Menschen an Glasbauteile wurden Kontaktkräfte in der Größenordnung: [Um 04] ca. 1,7 kN, [Sc 93] ca. 2,1 kN und [Sc 05] 4,5 kN gemessen. Dabei liegt die Steifigkeit des Menschen etwa bei einem Drittel der Steifigkeit des Stoßkörpers mit Zwillingssreifen.

In [Wö 00a] und [Rü 99] sind weitere Schulterstöße von Menschen dokumentiert. Da in [Wö 00a] keine Hinweise enthalten sind, bei welchen Kräften diese Steifigkeiten auftraten, wurden sie als Messwert in Bild 5.5 bei 0,1 kN eingetragen. Sie sollen lediglich zum Vergleich mit den anderen Ergebnissen dienen. Der Mittelwert aus acht Versuchen mit Menschen liegt bei 356 N/mm in der Nähe der Steifigkeit des Stoßkörpers. Da der Wert von 700 N/mm deutlich über den anderen Werten liegt, würde die charakteristische Schultersteifigkeit des Menschen vermutlich geringer ausfallen. Aussagekräftige Versuchsreihen darüber sind bisher nicht durchgeführt worden.

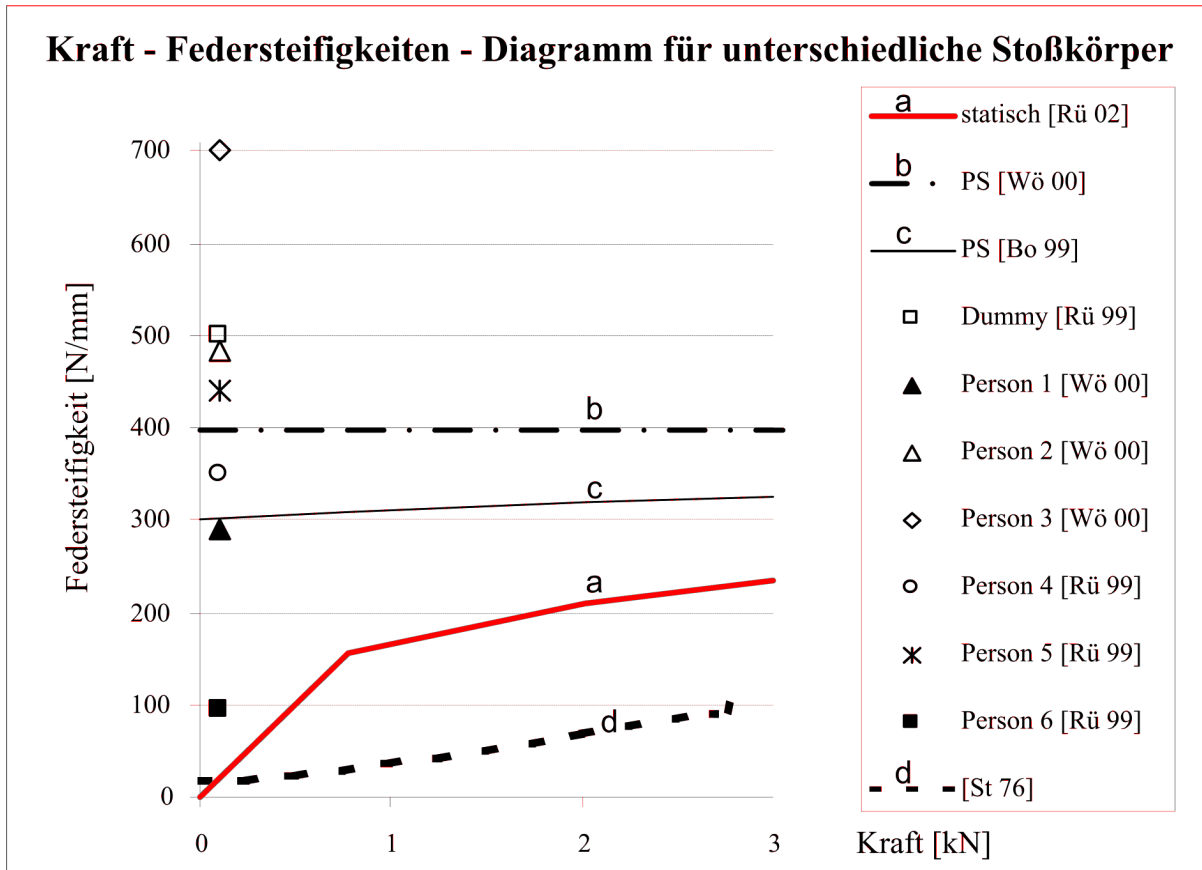


Bild 5.5: Steifigkeit Mensch und Stoßkörper

In [St 76] wird beschrieben, dass ausschließlich die Anprallgeschwindigkeit die Steifigkeit der Schulter beeinflusst. Die zumutbare Schmerzschwelle lag bei 1,85 m/s. Zurückgerechnet ergibt sich dabei eine Steifigkeit von 98,8 N/mm.

5.2.6 Der Mensch als Mehrmassensystem

5.2.6.1 Schwabbelmasse

Weniger als die Hälfte der Körpermasse ist im Skelett lokalisiert. Die Restmasse (Muskeln, Gewebe, Fett, Organe allgemein) wird elastisch und gedämpft am Skelett angekoppelt. Ein Simulationsmodell des Menschen mit Schwabbelmassen wurde in [Gr 87] vorgeschlagen. In [Cl 69] und [Gr 87a] ist die Verteilung der Massen gegeben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden diese Daten zusammengefasst und in Bild 5.6 und Bild 5.7 dargestellt. Allgemein wirkt ein Mensch beim Anprall oder Sprung als Mehrmassensystem. In [Go 61] sind diesbezüglich Hinweise enthalten. Mit diesem Ansatz wurden in [Re 93] und [Ho 93] der Sprung eines Menschen auf Gerüstbohlen mit Mehrmassensystemen nachgebildet. Untersucht wurde der Unterschied zwischen einem homogenen Stoßkörper und einem aus zwei Massen zusammengesetzten Stoßkörper. Es zeigte sich, dass die Einwirkung infolge der an das Knochengestüt des Menschen gedämpft - elastisch angebundenen „Schwabbelmasse“ m_{SM} gegenüber der beim Modell mit einem Massenpunkt reduziert ist.

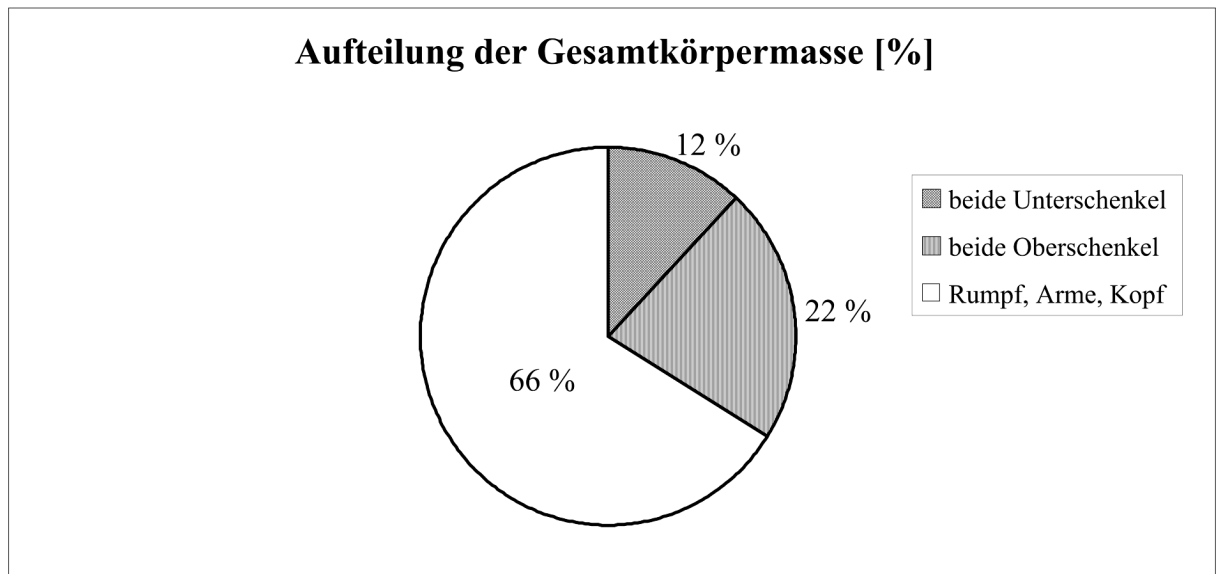


Bild 5.6: Aufteilung der Gesamtkörpermasse

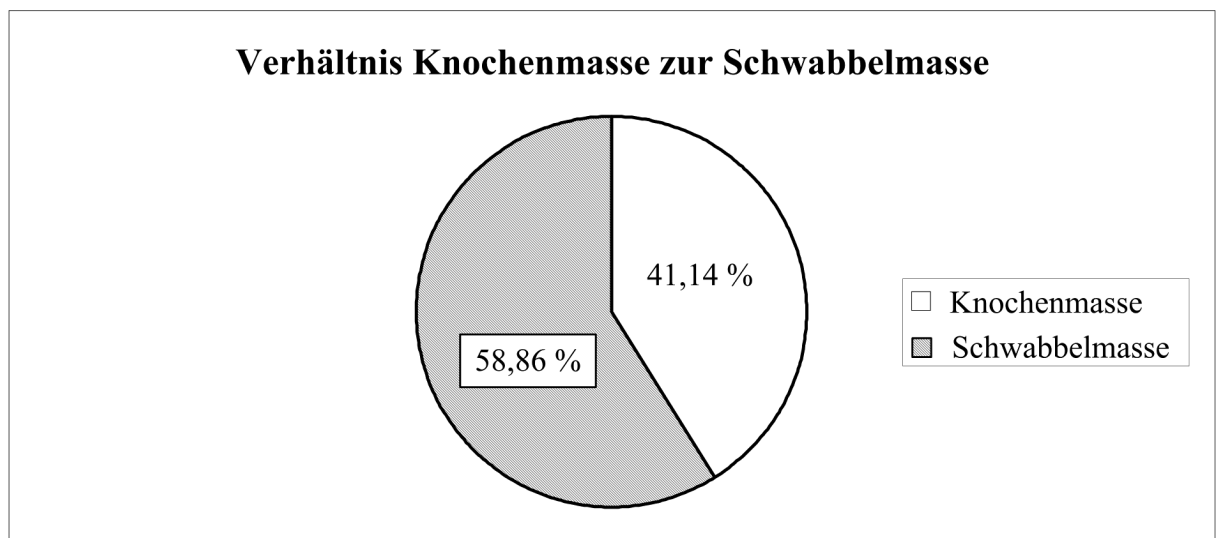


Bild 5.7: Knochenmasse / Schwabbelmasse

5.2.6.2 Modell des anprallenden Menschen

Das Stoßproblem des Anpralls des Zwillingsreifens auf Glasbauteile wird mit dem linearen Zweimassenschwingermodell abgeschätzt. Zum Verständnis des Verhaltens eines anprallenden Menschen ist in Bild 5.8 ein vereinfachtes Ersatzmodell darstellt. Mit dem Modell des Menschen mit der Einteilung in Knochen- und Schwabbelmassen, wurde dessen plastischer Anprall auf Gerüstbohlen in [Ma 92] und [Gr 93] simuliert. Bei diesen Berechnungen konnte der gemessene Einwirkungsverlauf auf die Gerüstbohle realistischer nachgebildet werden. Gegenüber einer einzigen Masse sind die einwirkenden Kräfte kleiner. Der Kraft – Zeit – Verlauf wird verlängert.

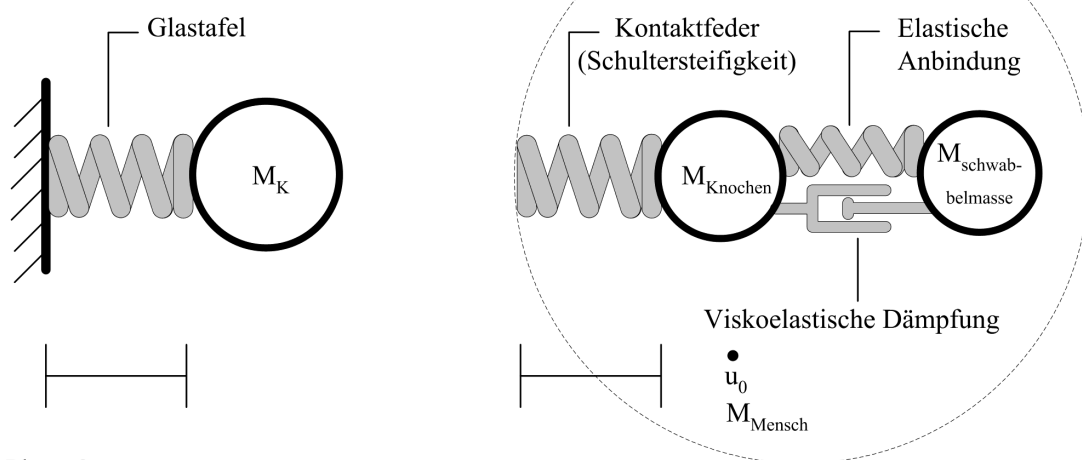
Mit dem Massen-Feder-Dämpfer-Modell wurden auch Schleudersitze in Flugzeugen ausgelegt. In [AF 73] und [AF 85] sind folgende Feder-Dämpfer-Kennwerte der Verbindung zwischen Schwabbel- und Knochenmassen gegeben:

- Elastische Federsteifigkeit 105 kN/m
- Viskoelastische Dämpfung 889 Ns/m

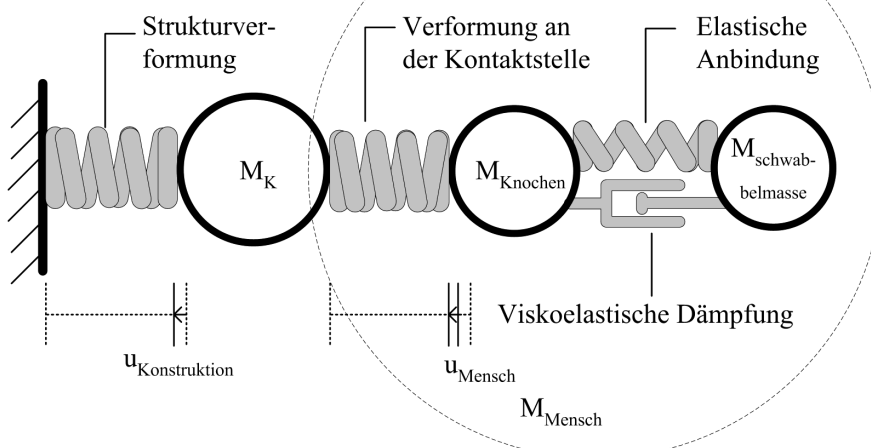
Eigene FE – Vergleichsberechnungen mit zwei über Feder und Dämpfer aneinander gekoppelte Stoßkörper, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, belegen keine signifikant anderen Kraft-Stoßverläufe als mit dem luftgefüllten Stoßkörper nach Abschnitt 1.1.1. Lediglich die Dekompressionsphase konnte bei der Simulation des Anpralls analog zu Bild 5.19 um 3 bis 5 Millisekunden verlängert werden. Die beim elastischen Anprall eines Menschen verzögerte Entlastungsphase wird nicht abgebildet. In der Realität bleibt der Mensch am Ende der Stoßphase schräg gegen die Glastafel gelehnt. Im Versuch wird ein verzögerter Kraftabbau gemessen. Berechnungen mit diesem Stoßkörper bilden den Anprall eines Menschen nur unwesentlich realistischer ab, nach Meinung des Autors lohnt sich der zusätzliche Berechnungsaufwand nicht.

Realistische Simulationen sind nur mit einem komplexen Dummy möglich, der zusätzlich auch das Bewegungsverhalten einzelner Körperteile berücksichtigen kann. Entsprechende Berechnungsergebnisse werden in Abschnitt 5.4.2 vorgestellt.

Phase 1:



Phase 2:



Phase 3:

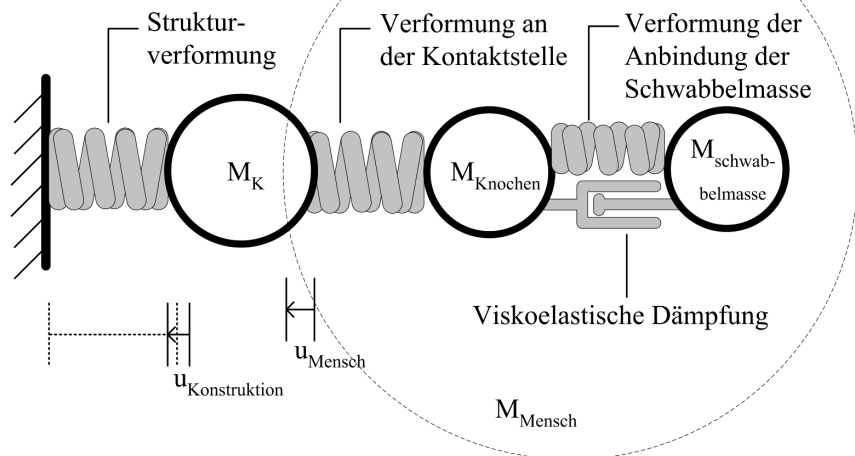


Bild 5.8: Statisches Ersatzsystem des anprallenden Menschen

5.2.7 Kontaktzeiten des Stoßkörpers nach DIN EN 12600 und des Menschen beim Anprall

Für den Zwillingsreifen als Stoßkörper wurden Kontaktzeiten mit allseitig gelagerten Glastafeln der Größe 1.050 mm x 2.056 mm gemessen. In [Rü 02a], Tabelle 8-1 werden für 8 mm ESG 54 ms, für MSI aus 2 x 8 mm ESG, je nach Auftreffort und Fallhöhe, Werte zwischen 46 bis 61 ms angegeben. Die kurzen Kontaktzeiten wurden bei steifen Auftrefforten (Ecke/Kante) und 900 mm Fallhöhe gemessen. Bei geringerer Fallhöhe oder einem Auftreffort mit lokal geringerer Steifigkeit werden die Kontaktzeiten länger. Vergleichsberechnungen verschiedener allseitig gelagerter Glastafeln bestätigen dies. Bei einer kleineren Fallhöhe wird das Luftvolumen in den Reifen weniger komprimiert, der Reifen ist weicher. Dieser Sachverhalt findet sich auch beim anprallenden Menschen wieder. Die Steifigkeit des Menschen (Kapitel 5.2.5) ist geringer als die des Stoßkörpers.

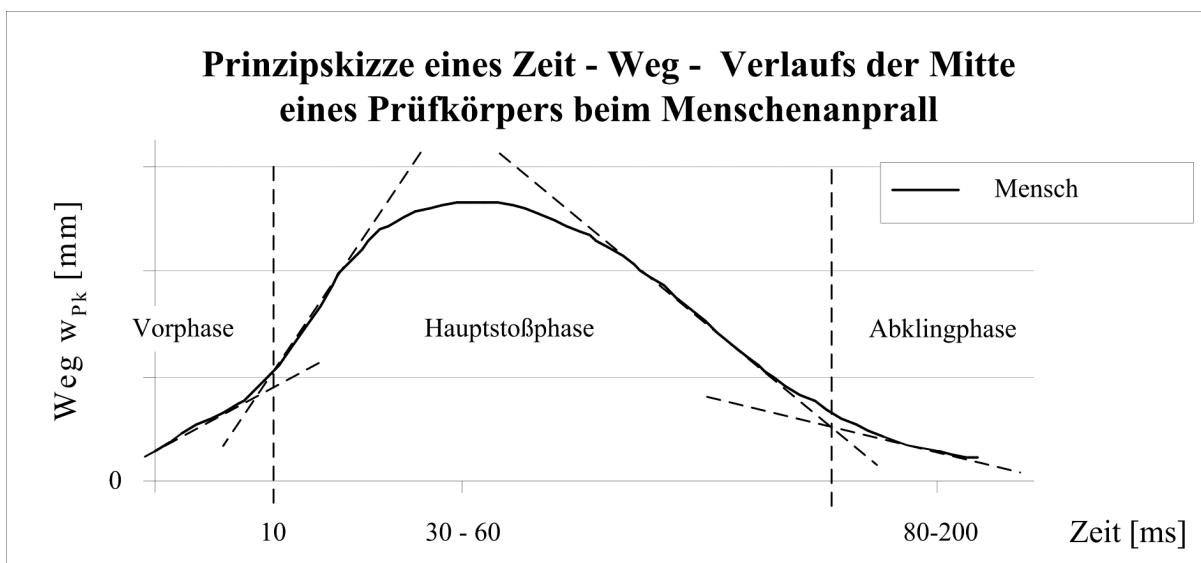


Bild 5.9: Prinzipieller Zeit - Weg - Verlauf eines Prüfkörpers beim Menschenanprall

Alle Versuche mit Menschen, die einen Schulterstoß gegen Glaselemente ausführten, zeigen eine typische Stoßcharakteristik Bild 5.9. Zunächst ergibt sich eine "Vorphase" bis zu ca. 10 ms, die jedoch nicht bei allen Versuchen deutlich ausgeprägt ist. Daran schließt sich die „Hauptstoßphase“ mit maximaler Einwirkung und Energieübergabe an. Nach dem Maximum nimmt die Einwirkung zunächst stark ab und geht abschließend in einen flacheren Verlauf über (siehe Bild 5.17 oder Bild 5.18). Die Belastung geht in dieser Phase nicht auf Null zurück, sondern verläuft noch einige Zeit auf niederem Niveau. Das Auftreten einer solchen "Abklingphase" wurde bei allen Versuchen mit Menschen beobachtet. In dieser Phase wirkt die Schwabbelmasse zeitverzögert auf die Glastafel. Das Verhältnis der Beanspruchung in dieser Phase im Vergleich zum Belastungsmaximum war bei den Versuchen unterschiedlich. In der 'Abklingphase' wurden in [Sc 93] maximal 30 % des Belastungsmaximums beobachtet. Dabei wurde die Stoßzeit bei den Versuchen mit Menschen und Dummies als Zeit zwischen dem ersten Kontakt der Stoßpartner bis zur Unterschreitung eines Schwellenwertes der Dehnung im Glas von 10 % des Maximums definiert.

In Tabelle 5.2 sind Versuchsauswertungen hinsichtlich der Kontaktzeit des Menschen am Glas beim Anprall dargestellt:

Tabelle 5.2: Kontaktzeiten des anprallenden Menschen

Geometrie der Glastafel $t \times b \times h_G$ [mm]	Masse Mensch [kg]	Stoßverlauf		Quelle
		Maximale Einwirkung nach [ms]	Kontaktzeit [ms]	
10 x 875 x 1938	-	30	80	[Sc 93] Abschnitt 4.1
8 x 1.050 x 2.056	75 - 89	65	150 bis 280	[Rü 99a] Bild 8
8 x 875 x 1938	83	20	80	[Sc 01] Bild 10.11
	90	32	75	
8 x 1.050 x 2.056	75	32 (Schulter) 48 (Kopf)	> 55	Simulation LS-DYNA Kapitel 5.4.3.2
Schalelement	82	30	86	[Sc 05]

Bei allen experimentellen Untersuchungen wurde kein Bezug zur Anlaufgeschwindigkeit des Menschen hergestellt. Somit ist keine geschwindigkeitsabhängige Steifigkeitsauswertung nach Gleichung (5.1) möglich. Die Aussage, dass die „... Ersatzsteifigkeit derselben Versuchsperson von Versuch zu Versuch zunahm, da offensichtlich die Angst vor Verletzungen nach bereits durchgeführten Versuchen abnahm ...“ [Sc 01] steht im Einklang mit der im Versuch gemessenen Abhängigkeit zur Anlaufgeschwindigkeit, da vermutlich mit fallender Hemmschwelle die Anlaufgeschwindigkeit zunahm.

5.2.8 Verletzungsrisiko beim Anprall an Glasbauteile

Ein Mensch kann sich beim Anprall an Glasbauteile bei Bruch des Glases Schnittverletzungen an scharfen Glassplittern zuziehen. Es ist zu erwarten, dass größere Glassplitter infolge ihrer schneidenartigen Geometrie gefährlicher als kleine Bruchstücke sind („ESG-Krümel“ nach dem Aufschlag auf einen Gegenstand). Ein definiertes Kriterium, ob eine Glasscherbe gefährlich oder harmlos ist, gibt es nicht. In Unfallberichten von Krankenversicherern [SL 02] im Zusammenhang mit dem Anprall an Floatglas oder TVG z. B. bei Türfüllungen, wird neben reinen Schnittwunden auch von Amputationen ganzer Gliedmaßen (Finger oder Arme) berichtet. Ebenso sind Fälle aus Kindergärten bekannt, bei denen sich Kinder bei Glasbruch Finger abgeschnitten haben. Beim Malen mit Finger- Fensterfarben kam es zu Glasbruch. In öffentlichen Gebäuden, Arbeitsstätten, Sporthallen werden ESG oder VSG gefordert [GUV 00]. Bricht eine Glastafel aus ESG während des Anpralls, zieht sich der Mensch unter Umständen oberflächliche Schnittverletzungen in der Haut (siehe Spontanbruch von Duschtrennwänden oder Autoschiebedächer) zu. Tiefe Schnittwunden oder Amputationen von Gliedmaßen sind unwahrscheinlich.

Nach Meinung des Autors sollten generell Verglasungen an Verkehrswegen, unabhängig davon, ob das Glas eine absturzsichernde Funktion übernehmen muss, aus ESG oder VSG ausgeführt werden.

Generell sind beim Anprall neben Schnittverletzungen, Hautabschürfungen und Frakturen auch traumatorische Verletzungen möglich. Die Verletzungsschwere von traumatorischen Verletzungen nimmt mit der Anprallgeschwindigkeit und der zunehmenden Steifigkeit des Bauteils zu. Da massive Bauteile mit sehr hoher Steifigkeit, z. B. Stahlbetonwände, verbaut werden dürfen, muss die Steifigkeit einer absturzhemmenden Glastafel auch nicht beschränkt werden, um Verletzungen zu minimieren. Nach einem Anprall an Glasbauteile mit niedrigen Fortbewegungsgeschwindigkeiten von $v_{a0} = 5 - 30$ km/h sind wenig ernsthafte Verletzungen zu erwarten [Sc 00]. Dieses „... geringe Risiko ...“ sieht auch [He 97] ebenfalls, wonach bei Anprallgeschwindigkeiten von unter 30 km/h nur ein Verletzungsrisiko als untere Toleranzgrenze mit einer Verletzungswahrscheinlichkeit von unter 40 % für Gesichtsverletzungen (gebrochene Nase) oder einem Unterschenkelbruch vorliegt.

Bei einer Anprallgeschwindigkeit zwischen 30 und 40 km/h liegt die Verletzungswahrscheinlichkeit für folgende Verletzungen ebenfalls unter 40 %:

- Schädelfraktur
- Genickbruch
- Rippenfraktur
- Abdomenquetschungen (Organe im Bauch)
- Beckenfraktur
- Armfraktur

Gesichtsverletzungen oder Unterschenkelbrüche haben bei diesen Geschwindigkeiten eine Verletzungswahrscheinlichkeit von bis zu 85 % [He 97].

Das Anprallszenario wird mit der rechnerischen Simulation mit Dummys in seiner Charakteristik nachgebildet. Daraus erhält man die mechanische Belastung (z. B. Zeit-Beschleunigungs-Verläufe). Diese kann der biomechanischen Systemantwort gegenübergestellt werden. Die biomechanische Systemantwort umfasst alle mechanischen und physiologischen Veränderungen einer Körperregion infolge mechanischer Belastung. Beispiele sind Verformungen des Körpers, z. B. Kopf - Nacken - Bewegungen bei einem Unfall oder Bewegungen und Deformationen des Gehirns im Schädel. Beim Anprall eines Menschen auf Glas tafeln sind Schulter- und Brustkorbdeformationen und Quetschungen oder Knochenbrüche am Oberarm die wahrscheinlichsten Folgen. Die biomechanische Systemantwort bedeutet nicht zwingend eine Verletzung. Verletzungen treten dann auf, falls die biomechanische Systemantwort derart ausfällt, dass das biologische System über eine Grenze belastet wird. Dabei werden anatomische Strukturen zerstört oder verändert. Die normale Funktion dieser Körperteile ist dann nicht mehr gewährleistet. Falls entsprechende Verletzungstoleranzen (z. B. Versuche mit Freiwilligen) existieren, können damit Aussagen über den Verletzungsmechanismus und die Verletzungsart getroffen werden [Sc 00].

Da für absturzsichernde Verglasungen mit Anprallgeschwindigkeiten (Laufgeschwindigkeit) deutlich unter 30 km/h zu rechnen ist (siehe Anhang A 2) wird in der Regel nicht mit ernsthaften Verletzungen zu rechnen sein. Die im Automobilbau verwendeten Abgrenzungskrite-

rien wie das Head – Injury – Criterion [Sc 00] oder Severity – Index [Sc 00] sind für die Eingrenzung von Schädelfrakturen oder Aussagen über Mortalitätswahrscheinlichkeiten ausgelegt. Damit sind keine Vorhersagen über Verletzungswahrscheinlichkeiten beim Anprall an Glasbaueile möglich.

5.3 Ergebnisse aus Versuchen mit anprallenden Menschen

5.3.1 Messdaten der Technischen Universität Darmstadt

Bei den Versuchen im Rahmen eines Forschungsprojekts [Wö 99] sind Freiwillige gegen Glastafeln gelaufen. Die Anlaufstrecke betrug 2,5 m. Die Anlaufgeschwindigkeiten wurden bis zur subjektiven Schmerzgrenze gesteigert, jedoch nicht gemessen. Dehnungsmessungen in der Glastafel bestätigen, dass der Anprall eines Menschen deutlich geringere Dehnungen und somit Beanspruchungen im Glas erzeugt als der Stoßkörperversuch. Bild 5.10 zeigt, dass die Glastafel nach dem Anprall des elastischen Stoßkörpers ausschwingt. Beim Menschenanprall wird hingegen das Ausschwingen unterdrückt. Ausgehend von diesen Erfahrungen wurden die ursprüngliche Fallhöhe von 1.200 mm bei raumhohen Verglasungen und 45 kg Stoßkörpermasse in der Entwurfsfassung der TRAV [E-TRAV 01] auf 900 mm und 50 kg Masse in den TRAV verringert.

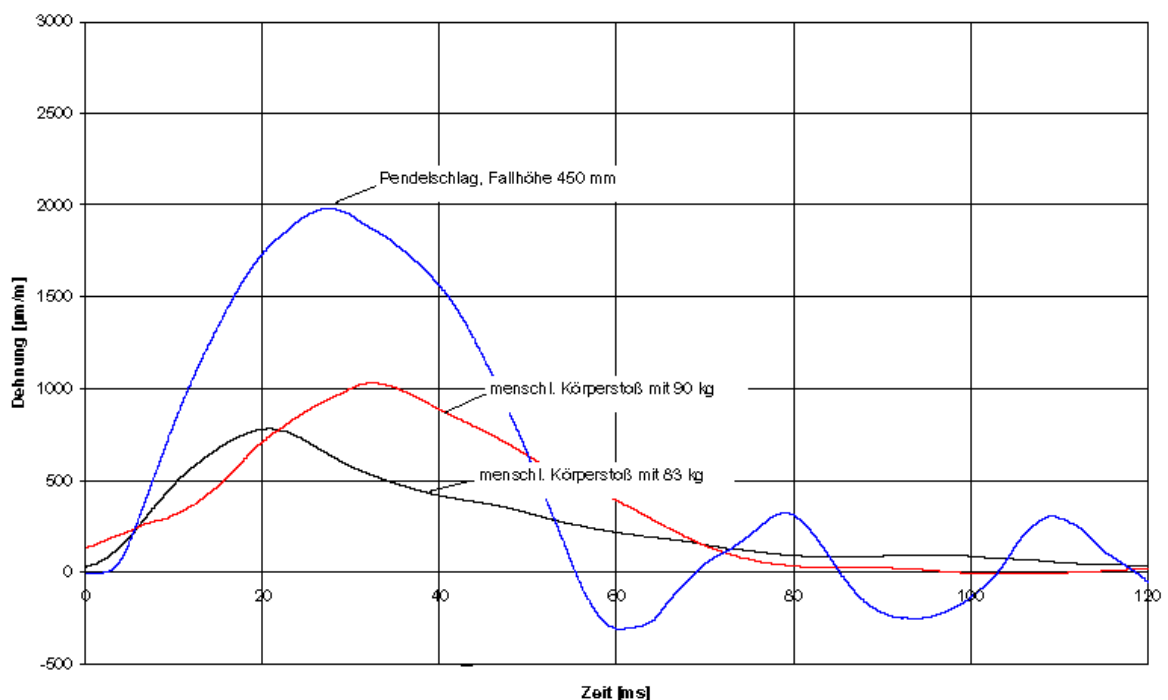


Bild 5.10: Verformungsverläufe der Glastafel nach dem Anprall eines Menschen oder eines Stoßkörpers, [Sc 01]
Bild 10.11

Ob die innere Hemmschwelle der Probanden höhere Einwirkungen verhinderte, ist unbekannt. Es gibt bisher noch keine Messwerte der Einwirkungen eines „Ernstfalls“, bei dem der Selbsthemmungseffekt beim Lauf gegen eine Glastafel wegfällt. Zudem können im Bauwesen

beispielsweise an abschüssigen Rampen oder Treppenläufen Situationen entstehen, in denen ein unkontrollierter Sturz höhere Einwirkungen erzeugen könnte. Konkrete Hinweise, dass die gewählten Einwirkungen solche Situationen nicht hinreichend konservativ abbilden würden, finden sich in der Literatur jedoch nicht. Im Grundsatz berücksichtigen die in den TRAV geforderten Fallhöhen viele ungünstigen Faktoren wie Einbausituation, Montagefehler, geringer Probenumfang, Unkenntnis der tatsächlichen Einwirkung usw. Dieses Vorgehen ist wissenschaftlich fragwürdig und wird nicht allen Situationen z. B. bei entsprechend überwachter Montage gerecht. Die unnötige Steigerung der Prüfeinwirkung (Fallhöhe) ist unwirtschaftlich. Dies zieht einen volkswirtschaftlichen Schaden nach sich, falls aus diesem Grund dickere Verglasungen eingebaut werden. Die untersuchten Anprallsituationen entsprechen den Szenarien, die bei üblicher Nutzung entstehen können. Bild 5.11 zeigt anschaulich, dass eine verminderte Prüffallhöhe ausreichend sein müsste. Die maximalen Dehnungen infolge des Pendelschlagversuches, dargestellt auf der linken Seite des Bilds, liegen deutlich über den Dehnungen, die beim Menschenanprall gemessen wurden. Die auftretenden Dehnungen sind im rechten Teil des Bildes Bild 5.11 dargestellt.

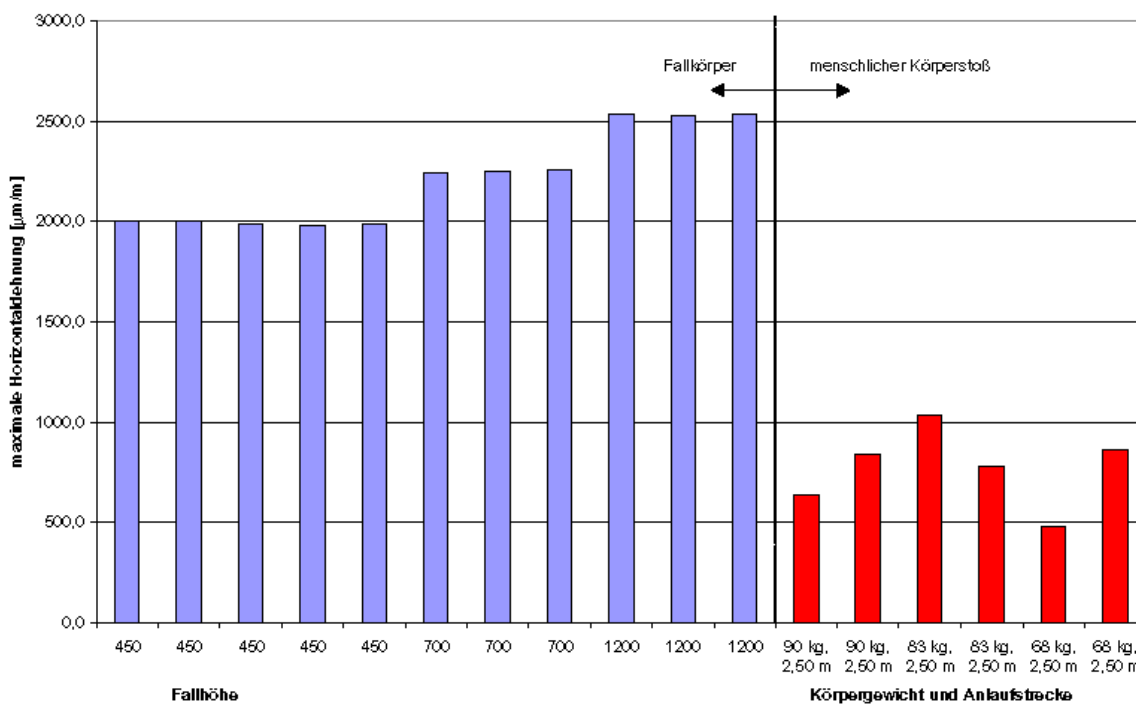


Bild 5.11: Vergleich der Dehnungen in der Glastafel nach [Wö 00a] Abb. 2.12

Der Hinweis in [Wö 00a] Abschnitt 7, dass die Einwirkung beim rechnerischen Nachweis reduziert werden kann, falls mit charakteristischen Werkstoffkennwerten gearbeitet wird, bestätigt das Vorgehen aus Kapitel 4. In unwahrscheinlichen Fällen kann es bei charakteristischen Einwirkungen Überschreitungen geben. Grenzen eines akzeptablen Restrisikos werden in [Pr 04] und [Wö 00] diskutiert.

Auch aus Bild 5.12 geht hervor, dass der Pendelschlagversuch höhere Dehnungen im Glas erzeugt, als unterschiedliche Anprallsituationen des Menschen (Schulter-, Ellenbogenstoß oder Tritt).

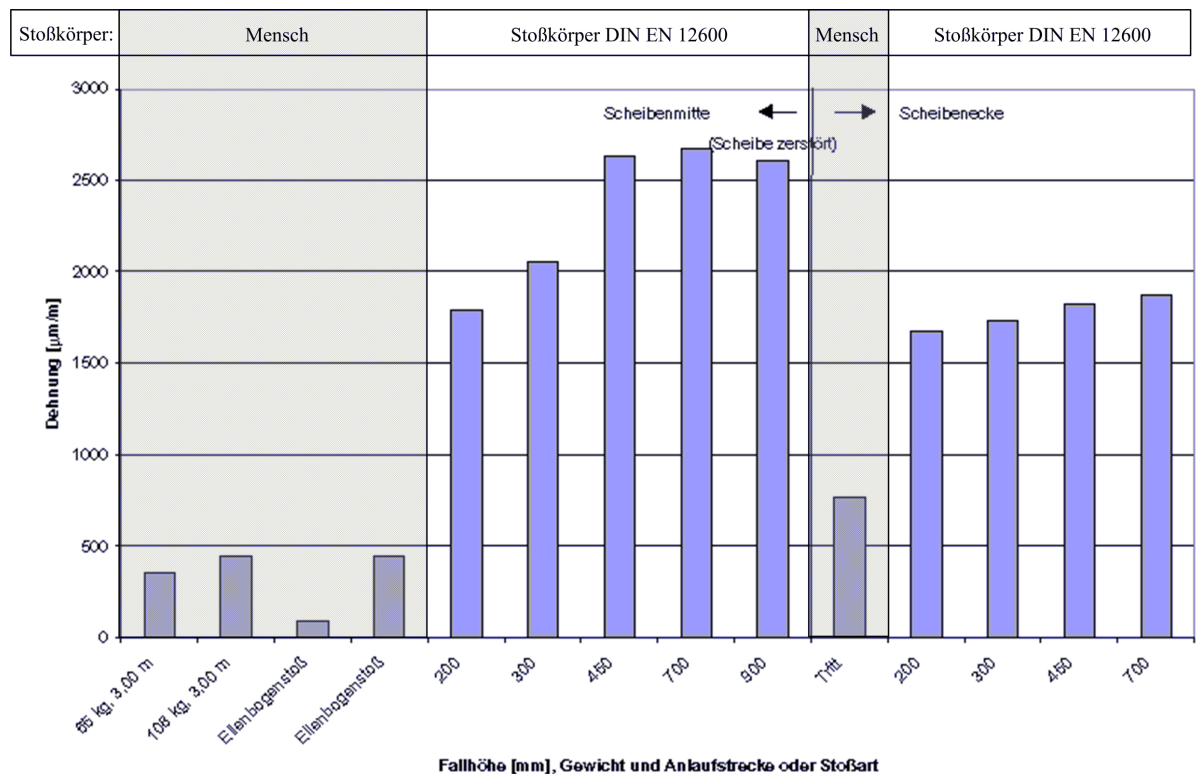


Bild 5.12: Maximale Glasdehnung infolge Anprall von Stoßkörper und Menschen, [Sc 01] Bild 10.13

5.3.2 Messdaten des Swedish Council for Building Research

Für das Swedish Council for Building Research wurden Versuche mit Menschen durchgeführt, die mit verschiedenen Gliedmaßen gegen unterschiedliche Bauteile rannten, fielen, rempelten oder schlugen. Die Ergebnisse sind in [Ni 76] dokumentiert. Ausgehend von diesen Messdaten schlägt [Ni 80] experimentelle Nachweise vor, Abschnitt 2.3 seiner Arbeit enthält Überlegungen ab wann das Risiko eines Versagens infolge eines Stoßereignisses akzeptiert werden kann. Dazu ist Gleichung (5.4) angegeben.

$$\varepsilon = \alpha \cdot \xi \cdot \varepsilon_0 \quad (5.4)$$

Tabelle 5.3: Parameter zur Berechnung des Anprallrisikos

ϵ_0	Grundwert der Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis z.B. für einen Menschenanprall. Ausgehend vom Sicherheitsindex $\beta = 4.26$ (siehe auch [GRUSIBA 81]) wird als „akzeptables Versagensrisiko“ $\epsilon_0 = 10^{-5}$ ($\alpha = 1$; $\xi = 1$) angenommen [Ni 80].
α	Parameter zur Wichtung der Nutzungshäufigkeit
ξ	Parameter zur Wichtung der Versagensfolge

Tabelle 5.4: Koeffizienten zur Wichtung des Verletzungsrisikos

$\xi=1$	Das Versagen der Struktur führt direkt zum Tod eines Menschen.
$\xi=10$	Das Versagen der Struktur beinhaltet ein ernsthaftes Verletzungsrisiko für den anprallenden Menschen wie ein Arm- oder Beinbruch.
$\xi=1.000$	Das Versagen führt zu keinen ernsthaften Verletzungen

Tabelle 5.5: Koeffizienten zur Wichtung der Nutzungshäufigkeit

$\alpha=1$	Übliche Nutzung
$\alpha=10$	Ungewöhnliche Nutzung
$\alpha=100$	Seltene Nutzung
$\alpha=1.000$	Sehr seltene Nutzung

Unterschieden werden Szenarien abhängig vom Verletzungsrisiko für den Menschen im Versagensfall und der Nutzungshäufigkeit der Absturzsicherung. Bei diesem Vorgehen könnten die Bauteile mit unterschiedlich hohen Einwirkungen beaufschlagt werden. Diese wissenschaftlich basierte Vorgehensweise hat jedoch den Nachteil, dass viele Fälle unterschieden werden müssen und die Auswahl der Parameter für die praktische Anwendung noch konkretisiert werden sollte.

Nach den zahlreichen Anprallversuchen mit Menschen [Ni 76] gegen Wände, Brüstungen, Treppengeländer usw. erachten es die Autoren von [Ni 80] als ausreichend, nur ein maßgebendes Szenario weiter zu verfolgen. Die Vorschläge zur Prüfung der Tragfähigkeit eines Bauteils unter stoßartigen Einwirkungen (siehe Tabelle 5.6) basieren auf der Annahme: „Versagen führt zu lebensgefährlichen Verletzungen“.

Zusätzlich zu den Versuchen mit Menschen wurden in Abschnitt 5.3, [Ni 80] Versuche zum Kalibrieren des Stoßkörpers durchgeführt. Für die maßgebenden Prüfungen wurde ein Sandsack verwendet. Dieser wurde zusätzlich mit Schaumstoff umwickelt, damit der Anprall gedämpft ausfiel und die Einwirkungen eines Menschen realistisch nachstellt. Die Studie mit verschiedenen Werkstoffdicken führt letztendlich auf 100 mm Schaumstoffdicke. Die Härte des Werkstoffs ist nicht klassifiziert, damit sind die Folgerungen aus den Versuchen wenig aussagekräftig.

Vertikale Bauteile werden in [Ni 76], Abschnitt 5 untersucht. Geprüft wurden die Einwirkungen entsprechend Bild 5.13. Unter anderem wurden die Folgen des Menschenanpralls gegen eine 10 mm dicke ESG-Tafel mit den Abmessungen von ca. 1.000 mm auf 2.000 mm untersucht. Die Glastafel war an der Oberkante an Schnüren aufgehängt und stützte sich horizontal gegen sechs Kraftmessdosen (in jeder Ecke und an der langen Kante in der Mitte). Die erzeugten Reaktionskräfte wurden aufsummiert und dynamische Überhöhungsfaktoren $\frac{P_{dyn}}{P_{stat}}$ bestimmt.

In [Ni 76] sind die Messergebnisse für unterschiedlichen Bauteile aber für jeweils ein Szenario nach Bild 5.13 zusammengefasst. Für die vorliegende Arbeit wurden die unterschiedlichen Messwerte, geordnet nach minimaler, mittlerer und maximaler Überhöhung jeweils nur für die Glastafel zusammengestellt. Damit ergeben sich für die Glastafel die Überhöhungsfaktoren nach Bild 5.14 bis Bild 5.16. Die Anprallsituationen 8, 10 und 11 nach Bild 5.13 lieferten Ergebnisse in der gleichen Größenordnung.

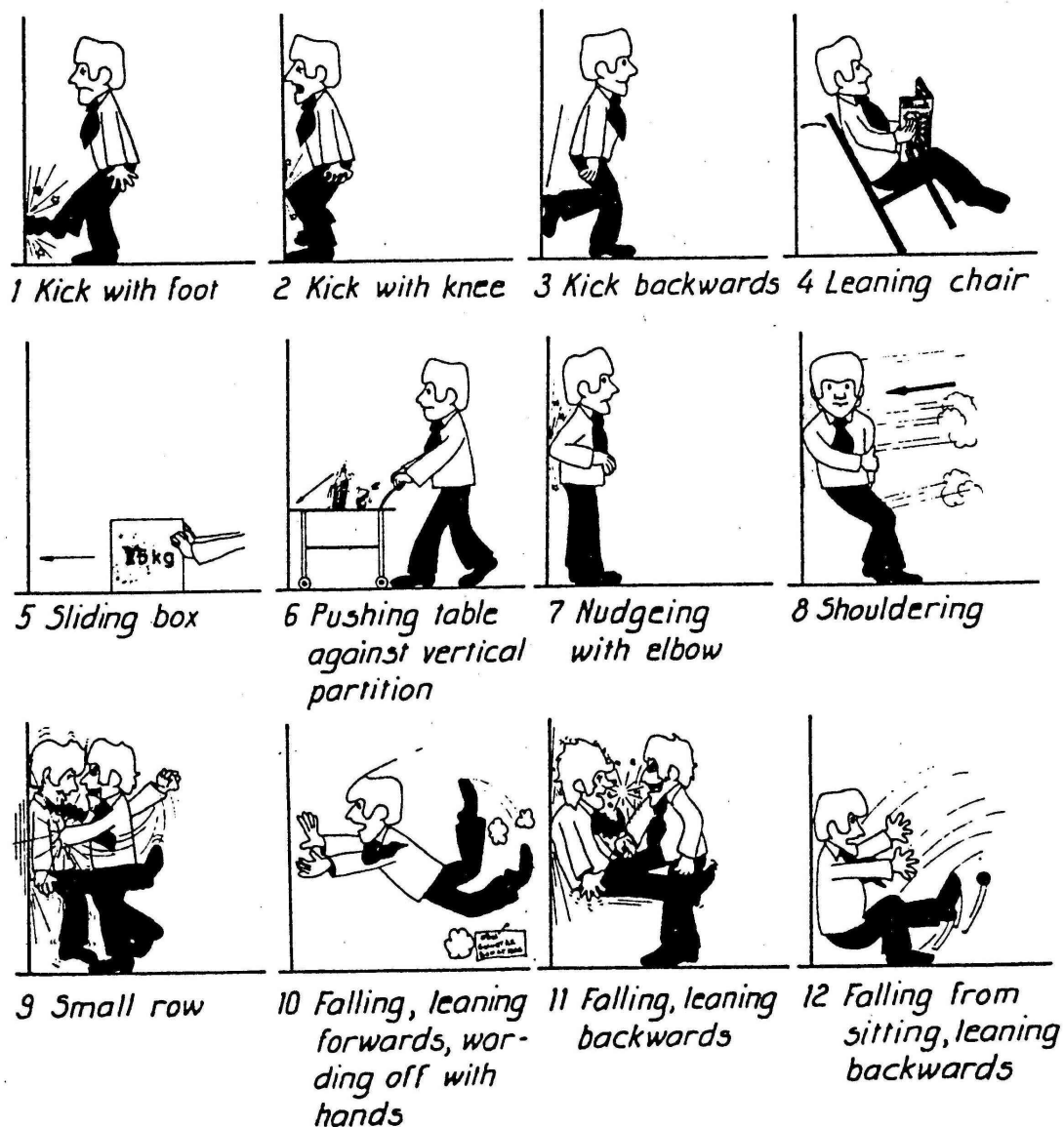


Bild 5.13: Stoßbeanspruchung durch Menschen nach [Ni 76], Abschnitt 5.3

Die Vorschläge von [Ni 80] gelten für vertikale Bauteile wie Balkongeländer, Handläufe und für Wände bzw. Fenster. Vorgeschlagen werden die Fallhöhen und Prüfkörper nach Tabelle 5.6, diese liegen unter den nach den TRAV geforderten Werten.

Tabelle 5.6: Vorschläge zum Nachweis stoßbeanspruchter Bauteile [Ni 80]

Bauteil	Sandsack [kg]	Fallhöhe [mm]	Dämpfer (Schaumstoff) [mm]
Balkongeländer	40	400	100
Handlauf	30	450	100
Wand/Fenster	30	500	100

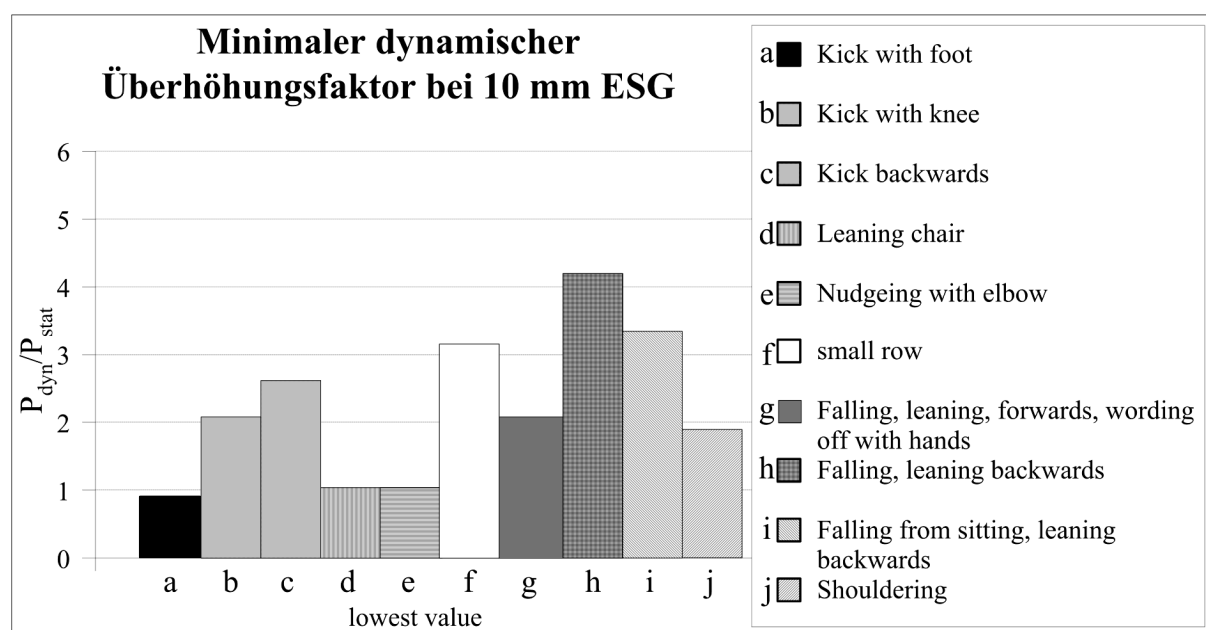


Bild 5.14: Minimalwerte des dynamischen Überhöhungsfaktors (nach [Ni 76])

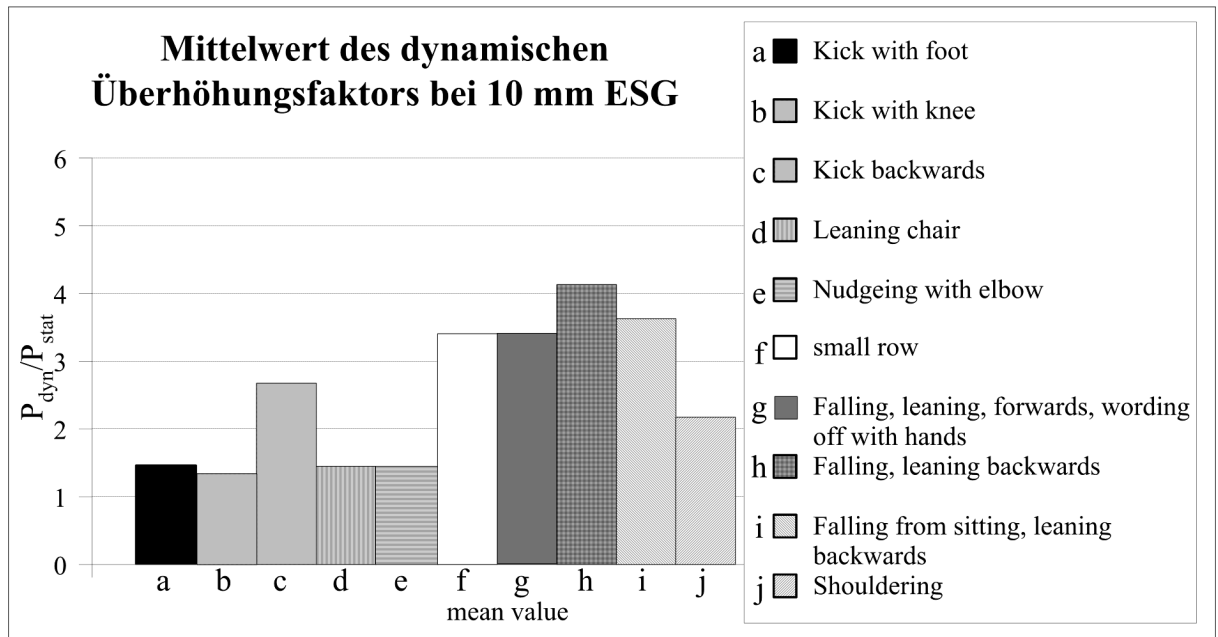


Bild 5.15: Mittelwerte des dynamischen Überhöhungsfaktors (nach [Ni 76])

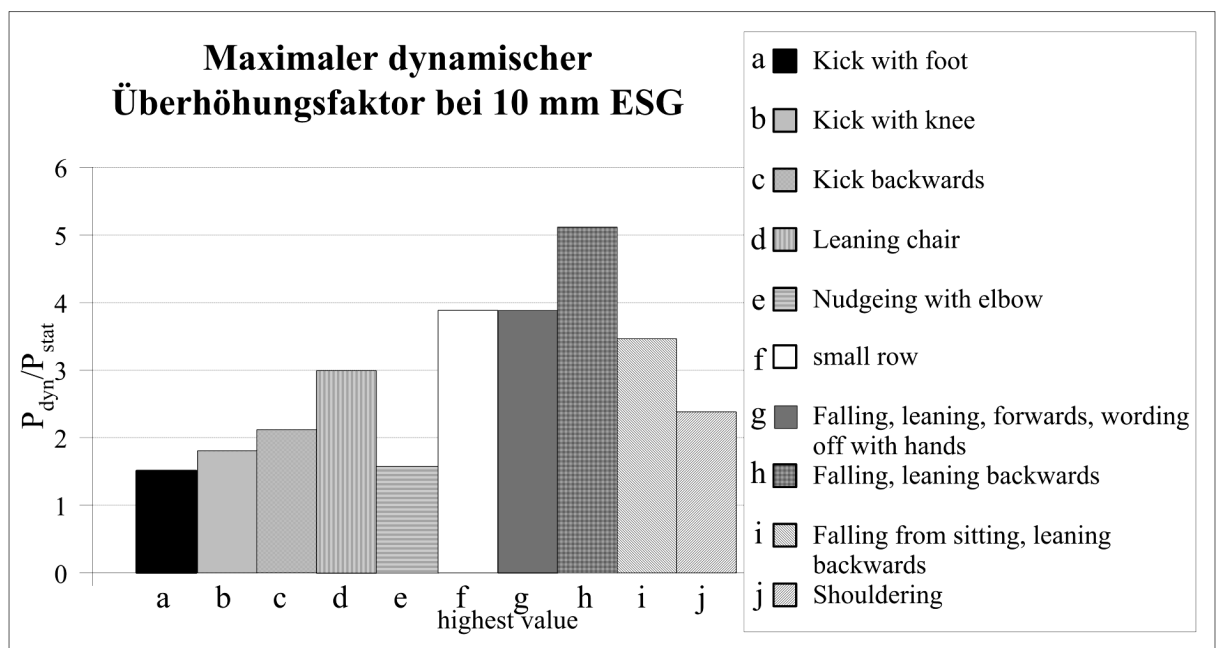


Bild 5.16: Maximalwerte des dynamischen Überhöhungsfaktors (nach [Ni 76])

Für absturzsichernde Bauteile ergibt sich damit für einen Menschen mit z. B. 75 kg Masse, der rückwärts gegen eine Glastafel fällt, eine maximale Einwirkung (Bild 5.16) von $5,1 \cdot 0,75 \text{ kN} = 3,83 \text{ kN}$. Der durchschnittlich gemessene Wert liegt nach Bild 5.15 bei $2,55 \cdot 0,75 \text{ kN} = 1,9 \text{ kN}$. Als Maximalwert beim Anprall der Schulter wurde $2,4 \cdot 0,75 \text{ kN} = 1,8 \text{ kN}$ erreicht. Der Mittelwert lag bei $1,35 \cdot 0,75 \text{ kN} = 1,01 \text{ kN}$.

Damit liegen die aus den Versuchsergebnissen zurückgerechneten Stoßkörperkräfte unter den Kräften, die im Stoßkörper nach DIN EN 12600 bei einer Fallhöhe von 450 mm (siehe Kapi-

tel 3.6.4). Die gemessenen Kräfte in Versuchen mit anprallenden Menschen beim Schulteranprall nach Bild 5.17 oder Bild 5.21 bestätigen die schwedischen Messdaten.

5.3.3 Messdaten des Instituts für Fenstertechnik in Rosenheim

Der in [Hu 95] gemessene Kraft-Zeitverlauf beim Menschenanprall ist in Bild 5.17 dargestellt. Die Werte wurden in den markierten Punkten gemessen und dazwischen als kontinuierlicher Verlauf ergänzt. Die Stoßphase ist mit nahezu 100 ms etwa doppelt so lang wie beim Stoß mit dem Zwillingssreifen auf allseitig gelagerte Glastafeln. Dementsprechend sind die maximalen Einwirkungen auf die Glastafel bei gleicher Ausgangsenergie gering.

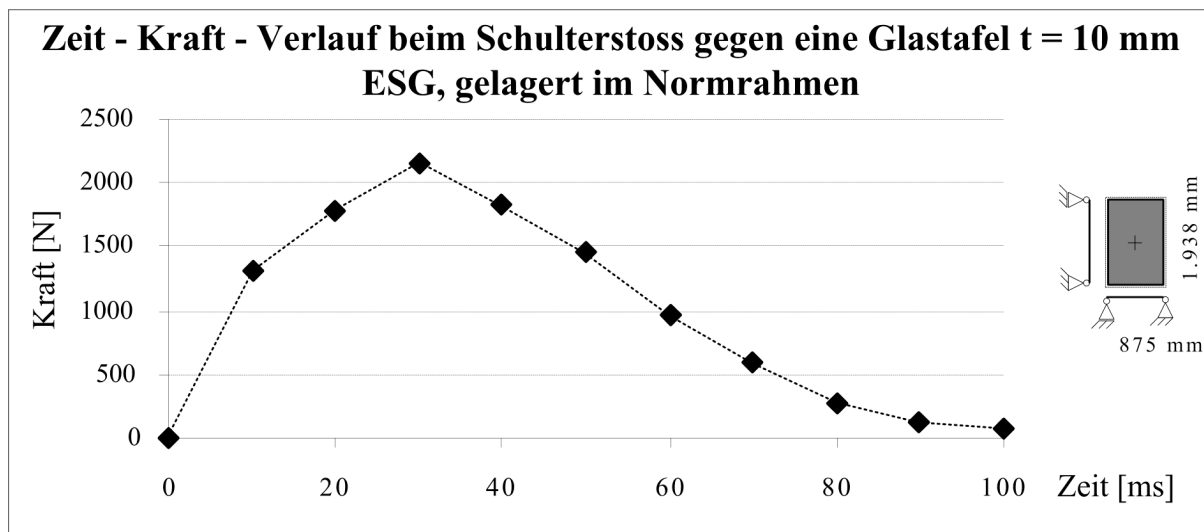


Bild 5.17: Kraft- Zeitverlauf beim Schulterstoß [Sc 93] Abs. 4.2

5.3.4 Messdaten der Technischen Universität Braunschweig

An der Universität Braunschweig liefen Menschen im Rahmen experimenteller Untersuchungen gegen eine Holzplatte, an die Kraftmessdosen befestigt waren. Untersucht wurden verschiedene Anprallsituationen (Fuß- und Schulterstöße). Die Messdaten sind in [Um 04] dokumentiert.

Die Prüfeinrichtung bestand aus einer quadratischen Holzplatte (Mehrschichtplatte) mit der Kantenlänge 500 mm und einer Dicke von 12 mm. Zwischen der Platte und der Unterkonstruktion, die aus zwei gekreuzten und verschweißten Quadrathohlprofilen aus Stahl 30 mm x 30 mm x 2 mm bestand, wurden vier Kraftmessdosen eingebaut. Die Kraftmessdosen waren an den Ecken eines Quadrates mit der Kantenlänge von 410 mm angeordnet. Die Mittelwerte und die Standardabweichung der gemessenen Kräfte sind in Tabelle 5.7 und in Tabelle 5.8 für unterschiedliche Anprallsituationen zusammengefasst. Es wurden nur Einwirkungen unter 2,5 kN gemessen.

Tabelle 5.7: Kräfte beim Umfallen eines Menschen [Um 04]

Kraft gemessen [kN] Umfallen mit Rolle Probenumfang n = 3		Kraft gemessen [kN] Umfallen ohne Rolle Probenumfang n = 2	
Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
0,77	0,17	1,18	0,24

Tabelle 5.8: Kräfte beim Anprall eines Menschen [Um 04]

Kraft gemessen [kN] Lauf Probenumfang n = 6	
Mittelwert	Standardabweichung
1,66	0,84

Ungeachtet der Streuung zeigt sich, dass die gemessenen Reaktionskräfte infolge des Menschen deutlich unter den Kräften des Pendelschlages des Kapitels 0 liegen.

5.3.5 Messdaten der Fachhochschule München

In [Bu 04] und [Bu 04a] sind zahlreiche Messdaten experimenteller Untersuchungen erfasst, die im Rahmen dieser Arbeit ausgewertet wurden. Dabei wurde auch der Anprall eines Skateboardfahrers untersucht. Die Person hatte eine Masse von 82,0 kg und wurde gegen eine 8 mm dicke, seitlich liniengelagerte Glastafel mit den Abmessungen 360 mm x 1.100 mm (H x B, siehe Kapitel 3.5.3) geschoben. Als Anprallstelle wurde die Schulter gewählt. Die Geschwindigkeit dieses Stoßkörpers [Bu 04a] konnte infolge technischer Probleme nicht mit der installierten Lichtschranke gemessen werden. In weiteren Versuchen wurde ein Beschleunigungsaufnehmer horizontal auf dem Skateboard befestigt, aus den Messwerten kann so auf die Anfahrgeschwindigkeit zurückgerechnet werden. Um Verletzungen der Probanden beim Anprall gegen die Glastafel auszuschließen, ist der Skateboardfahrer mit geringer Geschwindigkeit gegen den Prüfkörper gefahren. Der aufgezeichnete Beschleunigungsverlauf (siehe Bild 5.18) wurde für diese Arbeit mit einem 1.000 Hz Filter geglättet. Durch das Anfahren und Nachziehen des zweiten Beines beschleunigte der Skateboarder unregelmäßig. Die Integration führt auf eine Maximalgeschwindigkeit von 1,17 m/s. Schon bei dieser Belastung war die Schmerzgrenze in der Schulter der Probanden erreicht. In Bauwerken ist eine mehrfach höhere Anprallgeschwindigkeit nicht ausgeschlossen. Würde ein Mensch ungebremst mit maximaler Laufgeschwindigkeit gegen eine Glastafel prallen, so wären Verletzungen an den Gliedmaßen wahrscheinlich, lebensbedrohliche Verletzungen sind jedoch nicht zu erwarten. Mit diesen Untersuchungen wurde erstmals die Anprallgeschwindigkeit einer Person ermittelt. Daraus kann geschlossen werden, dass das Verhalten des Stoßkörpers nach DIN EN 12600 den Menschenanprall nicht realistisch abbildet.

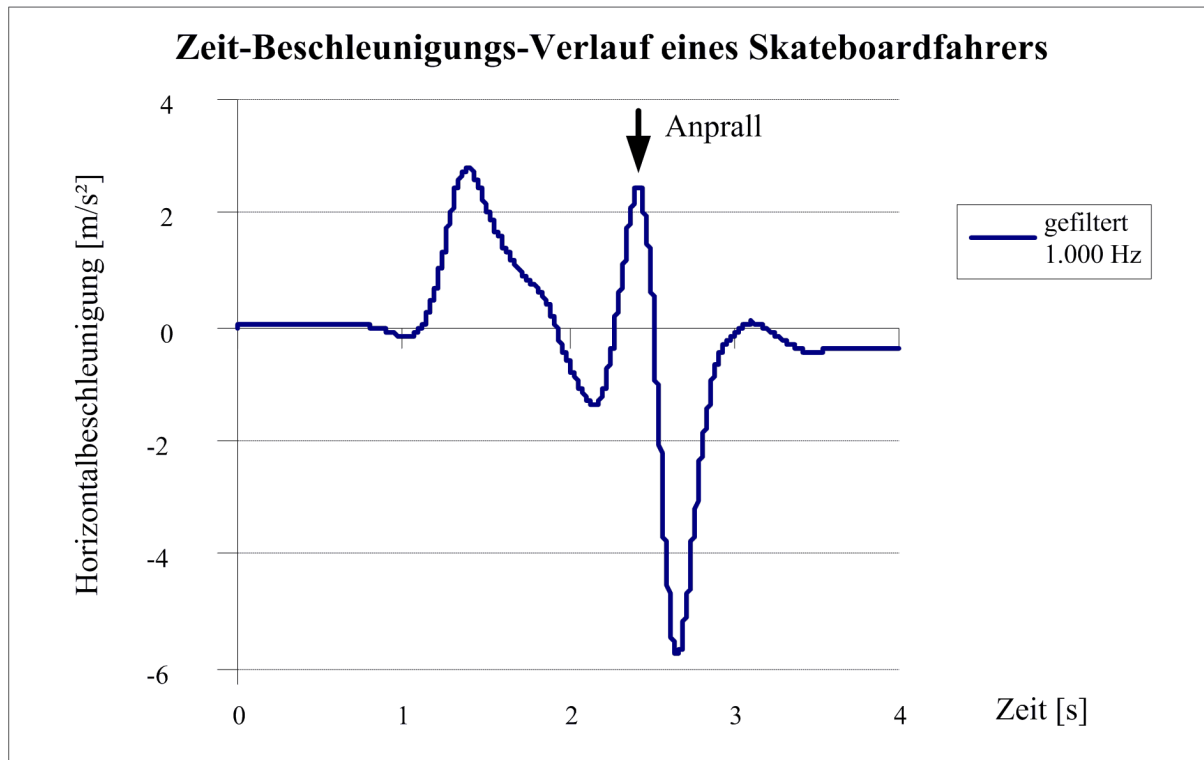


Bild 5.18: Geglätteter Zeit-Beschleunigungs-Verlauf des Skateboardfahrers, (Messdaten aus [Bu 04a])

Die Messkurven aus den Versuchen mit einem Stoßkörper nach DIN EN 12600 und einem anprallenden Skateboardfahrer sind in Bild 5.19 den Simulationsergebnissen mit LS-DYNA gegenübergestellt. Auch in diesem Beispiel des Stoßkörperversuchs mit 50 mm Fallhöhe (Bild 5.19, g) wird die Eignung des entwickelten FE Simulationsverfahrens wegen der guten Übereinstimmung der Rechenwerte mit den Messergebnissen (Bild 5.19, d) bestätigt. In den nachfolgenden Parameterstudien wird das FE-Stoßkörper-Modell mit dem im Versuch Menschenanprall verglichen. Zwei unterschiedlich schwere Stoßkörper (nach Norm mit 50 kg - und mit 82 kg gleich schwer wie der Proband), werden dem Menschenanprall gegenübergestellt. Die Aufprallgeschwindigkeiten werden in den Simulationen so gewählt, dass die beiden Stoßkörper mit jeweils gleicher kinetischer Energie gegen die Glastafel prallen.

Im direkten Vergleich zum Skateranprall zeigen die Berechnungen für einen Stoßkörper mit gleicher Geschwindigkeit (1,1 m/s) und Masse (82 kg) wie die Person folgendes Ergebnis: Der Stoßkörper nach DIN EN 12600 erzeugt eine um 50,3 % größere Verschiebung als für den Skater gemessen (Bild 5.19, Kurven f) SK 82 kg 1,1 m/s und c) Versuch Skater J3).

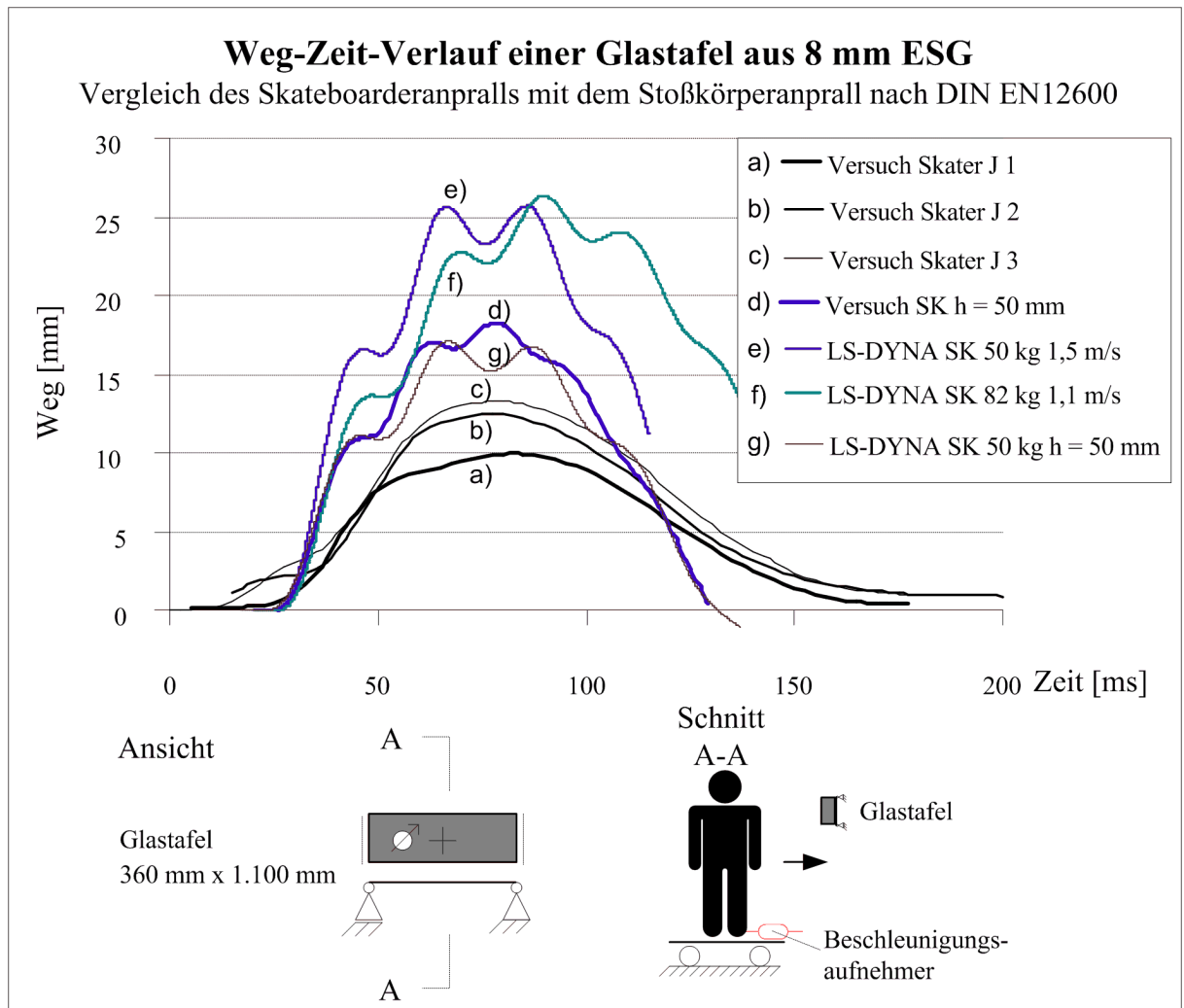


Bild 5.19: Skateboardfahrer und Stoßkörper nach DIN EN 12600 im Vergleich zum Berechnungsergebnis mit LS-DYNA (Messdaten aus [Bu 04a])

Zusätzlich wurde der Stoßkörperanprall nach DIN EN 12600 mit gleicher kinetischer Energie simuliert. Dabei prallt der Normstoßkörper mit 1,5 m/s gegen die Glastafel (Bild 5.19, Kurven e) SK 50 kg 1,5 m/s). Die berechneten Verschiebungen sind hier mit 51,3 % ebenfalls erheblich größerer als für den Skater gemessen. Die Simulationsergebnisse belegen, dass die Stoßcharakteristik des anprallenden Menschen vom Stoßkörper nach DIN EN 12600 nicht realitätsnah abgebildet wird. Ein Sicherheitsdefizit ist dennoch nicht zu erwarten, da der Stoßkörperanprall stärker ausfällt und größere Verschiebungen der Glastafel die Folge sind.

Das Steifigkeitsverhalten des Stoßkörpers beeinflusst das Schwingungsverhalten der Glastafel. In Bild 5.20 sind die gemessenen Dehnungen an der Glasoberfläche der stoßabgewandten Seite in der Glastafelmitte beim Anprall eines Stoßkörpers mit 50 mm Fallhöhe (Bild 5.20, Versuch SK h= 50 mm) und eines Menschen (Bild 5.20, Versuch Schulteranprall) gegenübergestellt. Am Ende der Dekompressionsphase prallt der Stoßkörper von der Glastafel ab, die Glastafel kann unbehindert schwingen. Dabei tritt ein Vorzeichenwechsel der Dehnungen auf. Der Mensch ist länger mit der Glastafel in Kontakt, weitere Schwingungen werden unterdrückt (Bild 5.20, Kurve Versuch SK h= 50 mm).

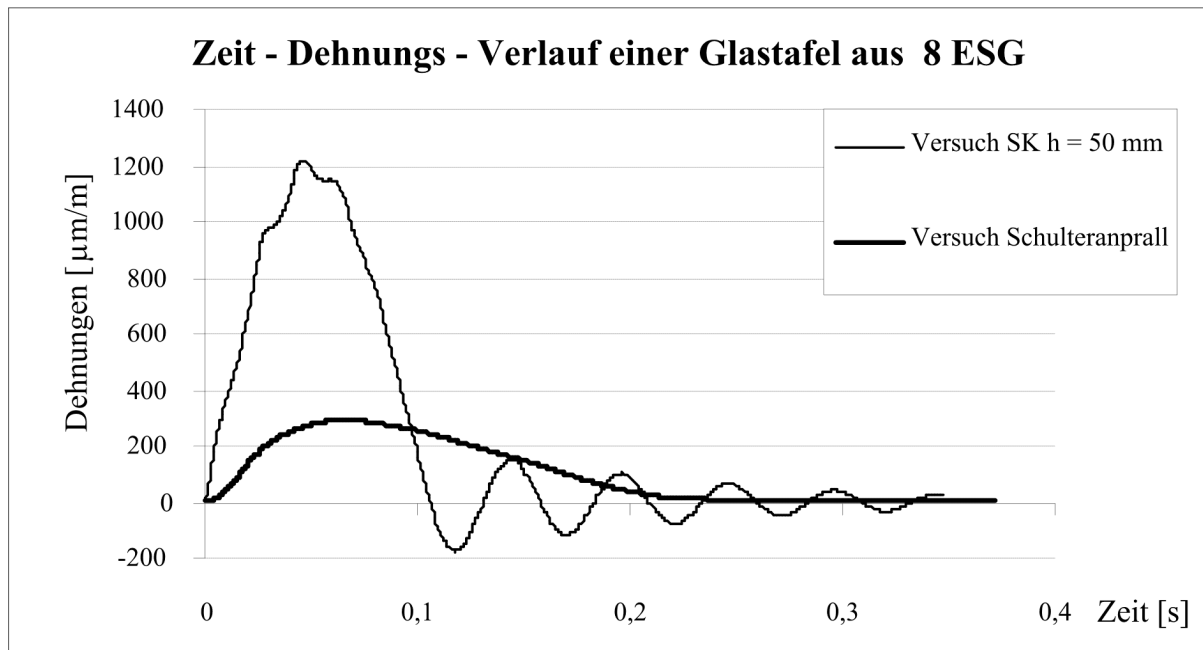


Bild 5.20: Vergleich Pendelschlagversuch – Schulteranprall (Messdaten aus [Bu 04a])

In [Sc 05] wurde die Auswirkung von verschiedenen Stoßkörpern beim Pendelschlag untersucht. Als Prüfkörper diente ein allseitig gelagertes rechteckiges Schalelement mit Abmessungen von ca. 700 mm x 1.500 mm. In einen mehrfach ausgesteiften Stahlrahmen ist als Schalhaut eine ca. 15 mm dicke Furnierschichtholzplatte eingebaut. Für die vorliegende Arbeit wurden die Messreihen verschiedener Stoßkörper ausgewertet und graphisch dargestellt. In jeder der vier Ecken war eine Kraftmessdose angeordnet. Ein Mensch mit 82 kg Masse prallte aus vollem Lauf mit der Schulter gegen das Schalelement. Die Kraft-Zeitverläufe aller Messdosen waren näherungsweise synchron. Der summierte Kraft-Zeitverlauf des anprallenden Menschen ist in Bild 5.21 dargestellt. Infolge der sich verändernden Schultersteifigkeit und der variierenden wirksamen Masse (siehe Kapitel 5.2.6.1) des anprallenden Körpers schwankt die Kontaktkraft während des Stoßes.

Der Freiwillige klagte noch zwei Tage lang über starke Schulterschmerzen, obwohl er beim Anprall eine wesentlich geringere Kraft als der Stoßkörper nach DIN EN 12600 bei 450 mm Fallhöhe erzeugt hatte.

Die gemessenen Zeit – Kraft – Verläufe von drei Pendelschlägen nach DIN EN 12600 sind in Bild 5.21 in den Kurven 450_1 bis 450_3 dargestellt. Der Stoß des Ersatzkörpers ist wesentlich kürzer als der Menschenanprall, Bild 5.21 Mensch 82 kg.

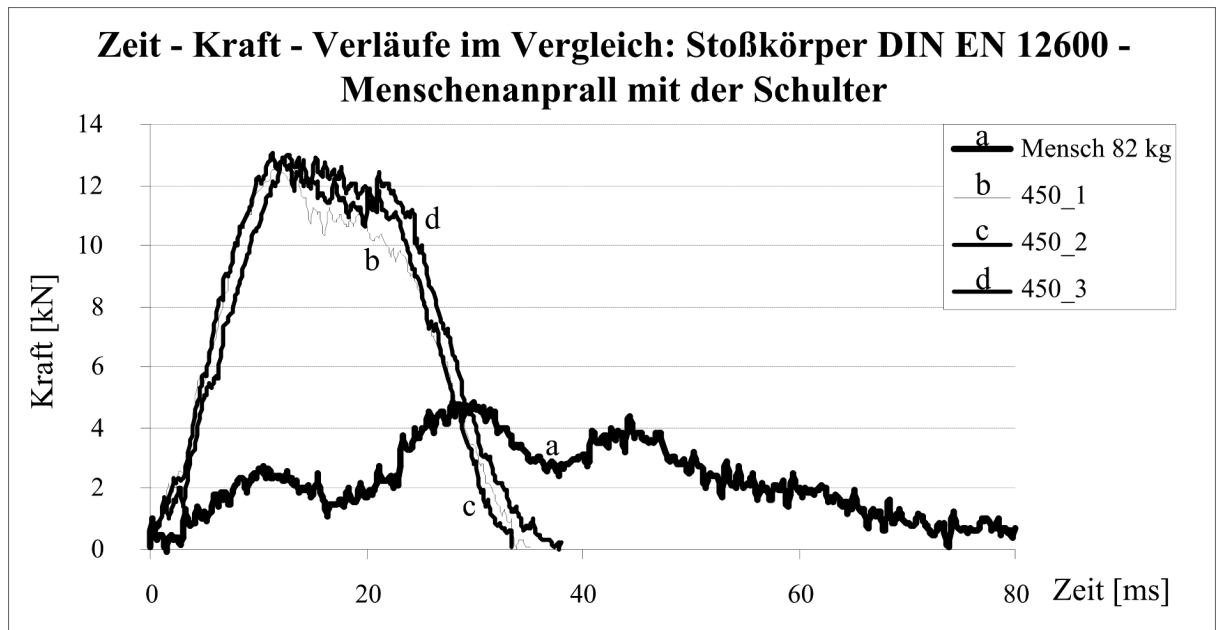


Bild 5.21: Vergleich Pendelschlagversuch Fallhöhe 450 mm – Schulteranprall eines Menschen mit 82 kg Masse (Messdaten aus [Sc 05])

5.3.6 Erkenntnisse aus den Messdaten

Die an verschiedenen Hochschulen und Instituten durchgeführten experimentellen Untersuchungen belegen, prallt ein Mensch gegen eine Glastafel, erzeugt dieser Anprall eine deutlich geringere Kraft als mit dem Stoßkörper nach DIN EN 12600 im Pendelschlagversuch bei einer Fallhöhe von 450 mm. Mit Ausnahme des Skateboardfahrers war bei den aufgeführten Untersuchungen kein Hinweis zur Anprallgeschwindigkeit des Menschen vorhanden. Es ist noch zu klären, welche Einwirkungen bei den maximal zu erwartenden Laufgeschwindigkeiten entstehen (siehe Anhang A 2). Ggf. muss die Einwirkung in Situationen bei denen hohe Laufgeschwindigkeiten (Sporthallen, Fußgängerzonen etc.) wahrscheinlich sind, erhöht werden.

5.4 Rechnerische Simulation des Anpralls von Menschen mit Dummies

5.4.1 Allgemeines

Rechnerische Anprallsimulationen mit Dummies können reale Unfälle simulieren. Diese Technik ist im Automobilbau ein hilfreiches Werkzeug zur Optimierung von Fahrzeugen. Es können die beim Autounfall auf den Menschen wirkenden Belastungen erfolgreich reduziert werden. Dies beweist die prinzipielle Eignung der Simulationen mit Dummies.

Das Programmsystem LS-DYNA ist für diese Computersimulationen geeignet. Die Aussagen aus den Berechnungen sind begrenzt, da die für Crashversuche verwendeten Dummies jeweils für spezielle Einsatzgebiete, wie sitzende Fahrzeuginsassen konzipiert sind. Trotz ihres menschenähnlichen Verhaltens besitzen sie eingeschränkte Bewegungsmöglichkeiten und sind für spezifische Anprallrichtungen ausgelegt. Realistische rechnerische Ergebnisse erhält man nur, wenn eine Validierung des Dummymodells für das Anprallszenario durchgeführt wird. Für Fragestellungen im Zusammenhang mit Unfallszenarien wie dem Seitenanprall werden die Modelle vom Herstellern hinsichtlich des Auftreffortes lokal verfeinert und mit Vergleichsdaten aus entsprechenden Crashtests validiert. Erkenntnisse zum biomechanischen Verhalten des Menschen werden dabei auf das Dummymodell übertragen.

5.4.2 FAT ES-2 Dummy

Das Modell wurde von FTSS (First Technology Safety Systems) in Zusammenarbeit mit DYNAmore zur Simulation eines Insassen beim Seitenanprall eines Autos entwickelt. Die Qualität der Ergebnisse bezüglich des physikalisch verwendeten Dummies wurde anhand zahlreicher Versuche überprüft. Das FE – Modell zeigt eine Übereinstimmung zu Versuchen am Originaldummy im gesamten kinematischen Verhalten, der Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, Kräfte und das Steifigkeitsverhalten an bestimmten Punkten der Attrappe, das mit Druckversuchen verglichen wird. Der Dummy wiegt 75 kg. Die einzelnen Bauteile können Bild 5.22 bis Bild 5.24 entnommen werden.

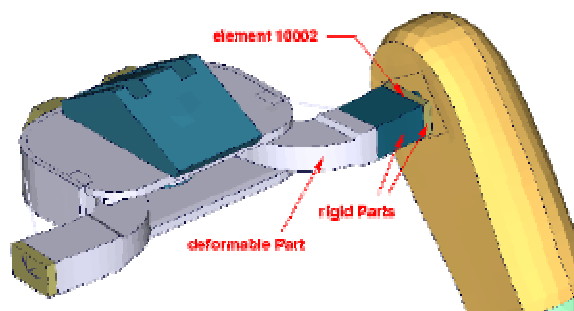
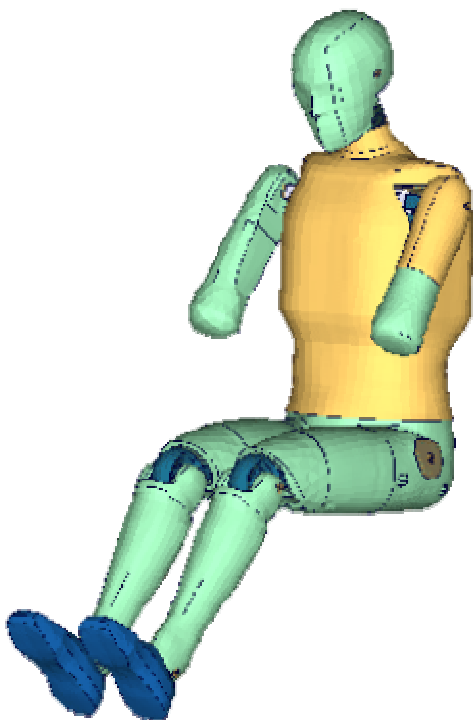


Bild 5.22: DYNAmore ES-2 Dummy (aus [DY 04]) Bild 5.23: Schulter im ES-2 Dummy (aus [DY 04])

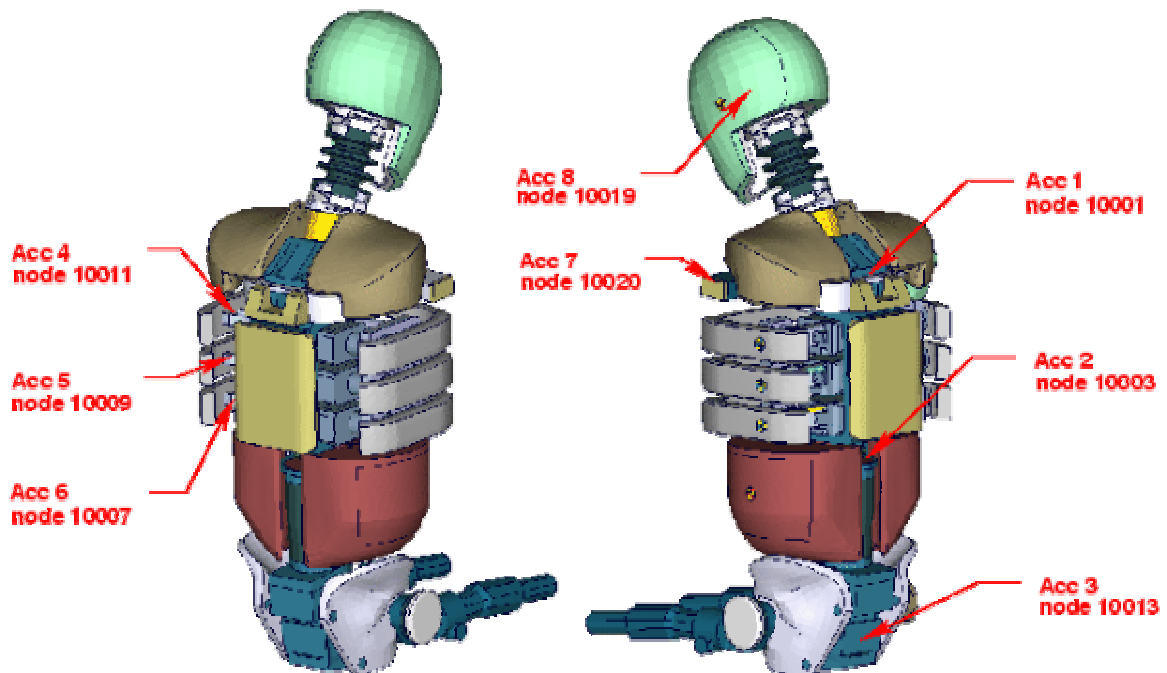


Bild 5.24: Beschleunigungsmesssensoren im ES-2 Dummy (aus [DY 04])

Die Simulation wird mit einem Side – Impact – Dummy in LS-DYNA durchgeführt. Dieser Dummytyp ist für den Seitenzusammenstoß im Automobil entwickelt und optimiert worden und entspricht dem Stand der Technik. Mit den Ergebnissen aus zahlreichen Versuchen wurden die Eigenschaften des Simulators angepasst und verglichen.

5.4.3 Bestätigung des Bemessungsvorschlages mit einem Menschensimulator (Dummy)

5.4.3.1 Allgemeines

Wird die Absturzhemmung einer Glastafel mit einem Menschensimulator (Dummy) nachgewiesen, dient die Laufgeschwindigkeit, mit welcher der Dummy gegen die Glastafel prallt, als Eingangsgröße. Zur Bestätigung des Bemessungskonzepts wird schnelles Laufen in einem Zimmer als maßgebendes Prüfkriterium gewählt.

5.4.3.2 Glastafel 8 x 1.050 x 2.056

Exemplarisch werden die Berechnungen mit dem Dummy an der rechteckigen Glastafel aus Anhang A 15.2 durchgeführt (siehe Bild 5.25). Die Glastafel mit den Abmessungen 1.050 mm x 2.056 mm wurde aus Schalenelementen modelliert. Die Elastomere der Randlagerung mit der Dicke 5 mm wurden mit Volumenelementen und linear elastischem Werkstoffverhalten abgebildet. Das Elastomer wurde im FE – Modell auf einem ideal starren Rahmen gelagert.

Als Anprallstelle wird die Schulter gewählt. Nach dem kritischsten aber unrealistischen Szenarios eines „horizontal fliegenden Dummys mit Kopfanprall“ ist der Schulteranprall nach Meinung des Autors als maßgebend anzusehen (siehe auch [Rü 99a]). Als Prüfzenario wurde

schnelles Laufen eines Nichtsportlers mit 5,0 m/s gewählt, wie es selten in Gebäuden vorkommen könnte. In der Berechnung wird der ungebremste Anprall des Menschen ohne Boden – Füße – Kontakt simuliert. Damit liegt dieses gewählte Unfallszenario über den geforderten Prüfeinwirkungen, da die gesamte Masse des Dummy mit 75 kg auf die Glastafel einwirkt. Die Simulation liefert folgende Ergebnisse:

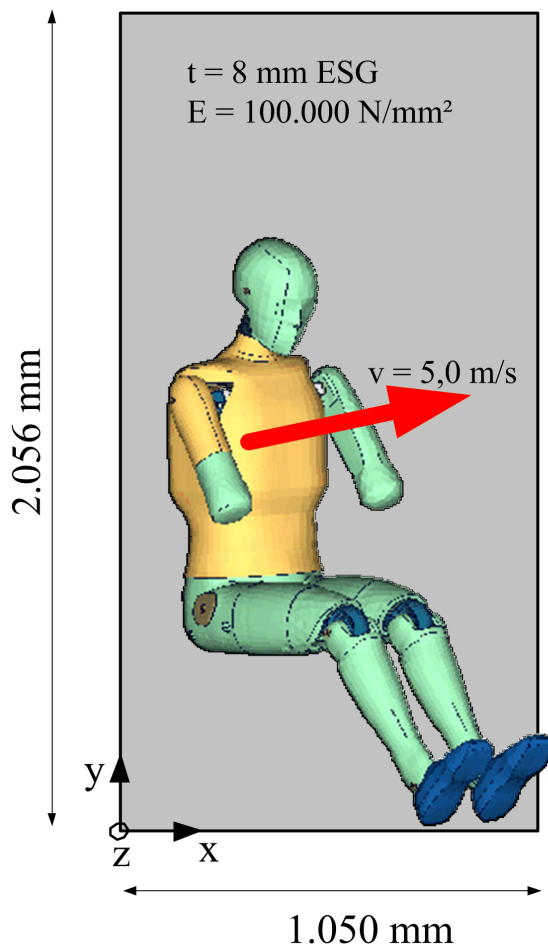


Bild 5.25: Glastafel 8 x 1.050 x 2.056 mit Dummy

Der Ablauf des Anpralls ist in Bild 5.26 dargestellt. Zunächst schlägt die Schulter auf die Glasoberfläche auf, 10 ms nach dem Anprall wird die Schulter deutlich in den Oberkörper gedrückt. Nach 35 ms prallt der Kopf zusätzlich gegen die Glastafel. Nach dem vollständigen Abbremsen des Körpers wird dieser entgegen der ursprünglichen Laufrichtung beschleunigt. Nach 53 ms bewegt sich der Kopf von der Glastafel weg. Nach 70 ms hat sich der gesamte Körper vom Glas gelöst.

Vor dem Anprall hat der Dummy eine einwirkende Energie von 938 Nm. Während des Anpralls werden nur 139 Nm als kinetische und elastische Energie in die Glastafel übertragen.

Würden nur 60 % der Körpermasse als wirk-same Masse wirken (Kapitel 3.4.2.1), ergäbe sich $0,6 \cdot 139,0 = 83,4$ Nm. Zudem gehen die [UEAtc 82], Tabelle 2.1 für seltene Stöße nur von einer Laufgeschwindigkeit mit 2 m/s aus. Damit ist die charakteristische Einwirkung von 100 Nm für den Nachweis bei üblicher Nutzung ausreichend.

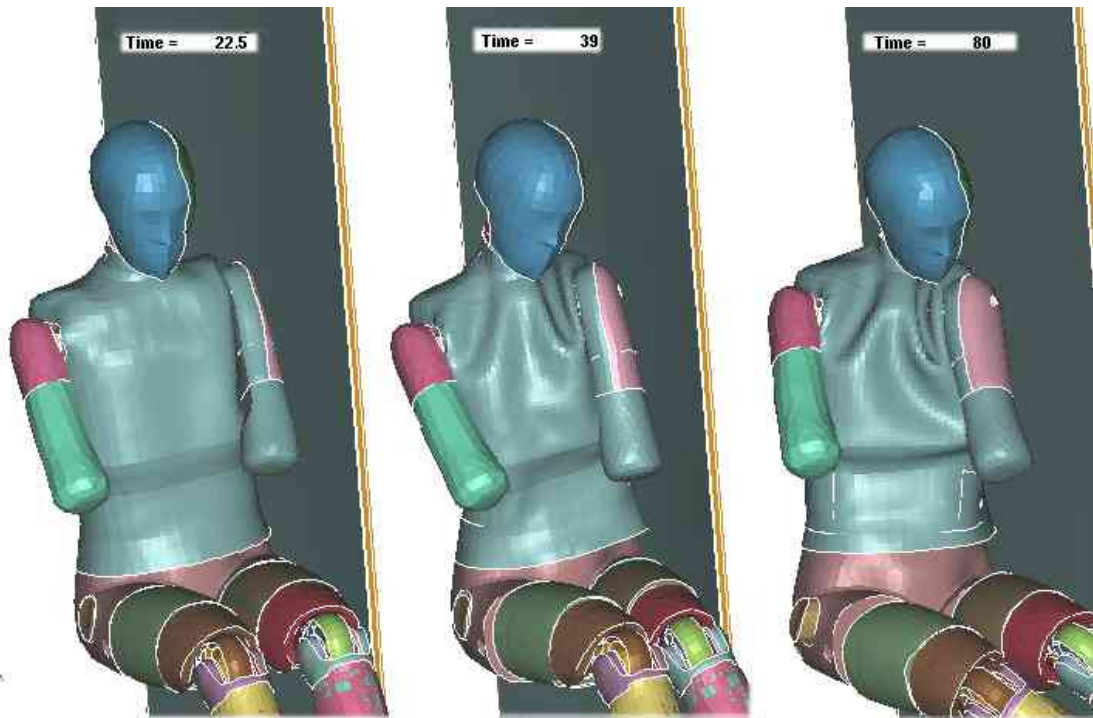


Bild 5.26: Anprall des ES-2 Dummy gegen 8 mm ESG 1.050 mm x 2.056 mm, Simulation

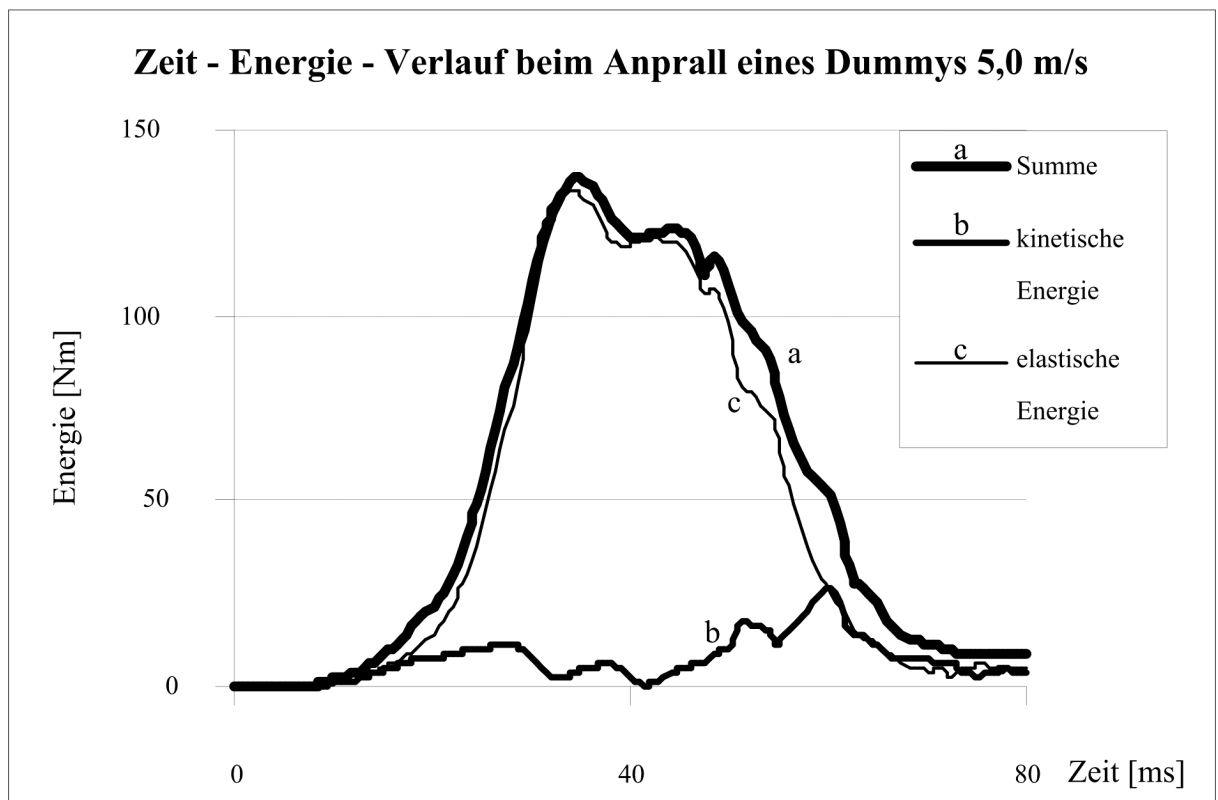


Bild 5.27: Energieverteilung beim Anprall des ES-2 Dummy mit einer Anprallgeschwindigkeit von 5 m/s

5.4.4 Vergleich des Dummys mit dem Pendel nach DIN EN 12600

In den nachfolgenden Berechnungen wird die Fallhöhe des Pendels gesteigert, bis die maximal in die Glastafel übertragene Energie der bei der Simulation mit dem Dummy übertragenen Energie entspricht. Mit dieser Untersuchung wird die Frage geklärt, ob der Stoßkörper zur Simulation des Menschenanpralls geeignet ist.

Bei einer Fallhöhe des Stoßkörpers von 680 mm werden bereits 3,5 % mehr Energie auf die Glastafel übertragen als mit dem Dummy, Tabelle 5.9. Die Berechnungsergebnisse bestätigen, dass die charakteristische Energie von 100 Nm für übliche Nutzungen im Hochbau ausreichend konservativ ist.

In Bild 5.28 ist der Vergleich der Energieanteile dargestellt, die auf die Glastafel wirken. Anhand der in Bild 5.28 mit Kreis gekennzeichneten Ziffern wird der Stoßvorgang beschrieben:

Die Steifigkeit der Menschenschulter ist zunächst geringer als die des Stoßkörpers (Bild 5.28/ 1). Die Energieübertragung findet langsam statt. Ist das Haut- und Muskelgewebe zusammengedrückt, und bilden die Knochen der Schulter den maßgeblichen Anteil an der Schultersteifigkeit, wird das Verhalten zwischen Dummy und Stoßkörper ähnlich. Die Stoßdauer des Stoßkörpers ist geringer als die des Menschen (Bild 5.28/ 2). Der verzögerte Einfluss der Schwabbelmasse verlängert den Stoß (Bild 5.28/ 3). Die Glastafel wird von beiden Stoßkörpern in gleicher Weise beschleunigt, da die kinetische Energie in der gleichen Größenordnung liegt (Bild 5.28/ 4). Die Glastafel verformt sich infolge des Stoßes. Dabei speichert sie elastische Energie (E_{el}). Der vergleichsweise steifere Stoßkörper prallt schneller wieder von der Glastafel ab und kann weniger Energie aufnehmen. In der Glastafel verbleibt mehr Energie, die Glastafel schwingt noch deutlich, wenn sich der Stoßkörper schon vollständig von ihr getrennt hat (Bild 5.28/ 5).

Für die Nachweise einer absturzhemmenden Glastafel mit dem Bemessungsvorschlag aus Kapitel 4 ist es erforderlich, dass die Energie des Ersatzstoßkörpers innerhalb der realen Kontaktdauer zwischen Mensch und Glas übertragen wird. Der Stoßkörper nach DIN EN 12600 weist eine deutlich kürzere Kontaktdauer auf. Dies ist für die Glasdimensionierung konservativ, jedoch unwirtschaftlicher. Grundsätzlich eignen sich Ersatzkörper mit den Eigenschaften des Zwillingsschneidbretts für die Berechnungen.

Bild 5.29 stellt den Kraftverlauf des Stoßkörpers und des Dummys beim Anprall dar. In den ersten 15 ms übt der Dummy die „Vorbelastungsphase“ (Bild 5.29/ a) auf die Glastafel aus, die bei experimentellen Untersuchungen ebenfalls festgestellt wurde. Die Schulter hat Kontakt zur Glastafel, der Oberarm wird gegen den Brustkorb gedrückt. Die Steifigkeit des Dummy ist in dieser Phase gering. Nach 15 ms liegt zusätzlich die Hüfte mit an (Bild 5.29/ b), gleichzeitig nimmt die Steifigkeit der Schulter zu, da das Muskelgewebe komprimiert ist, und die Nachgiebigkeit maßgeblich aus den über Bändern zusammengehaltenen Knochen, auch mit Kontakt zwischen Knochen, herrührt (Bild 5.29/ c). Der gesamte Dummy dreht sich nach 22 ms um die Körperlängsachse. Der Drehpunkt ist die an der Glastafel anliegende Schulter

(Bild 5.29/ d). Die weitere Drehung wird mit dem Anschlagen der oberen Rippen, hinter dem Oberarm, behindert. Nachdem der steifere Brustkorb abgebremst ist, wirkt zusätzlich die Schwabbelmasse der inneren Organe. Die Kontaktkraft springt sprunghaft auf 17 kN (Bild 5.29/ e). Die stoßabgewandten Gliedmaßen werden über die Knochen ebenfalls verzögert und verlängern die Stoßphase (Bild 5.29/ f). Nach 43 ms schlägt der Kopf gegen die Glastafel. Der vergleichsweise steife Kopf wird schlagartig verzögert. Infolge seiner Masse von ca. 4 kg [Gö 98] erhöht er die Kontaktkraft schlagartig auf den Maximalwert nach Tabelle 5.10 (Bild 5.29/ g). Nach und nach verliert der Körper wieder Kontakt und trennt sich nach 70 ms komplett von der Glastafel (Bild 5.29/ h).

Während dieses Stoßes wird ein maximaler Faktor $\frac{P_{dyn}}{P_{stat}} = 28,44$ erreicht. Der dynamische

Überhöhungsfaktor ist, bei der hier höheren Anprallgeschwindigkeit, 5,6-mal größer als der Maximalwert, der mit lebenden Menschen in den Untersuchungen in Kapitel 5.3.2 gemessen wurde. Die Muskeln des Dummy sind im Rechenmodell nicht angespannt, der Kopf prallt mit voller Wucht gegen die Glastafel. Aus Bild 5.26 wird deutlich, dass sich der Dummy erheblich verformt. Beim realen Menschen würden in dieser Situation die Knochen im Anprallbereich mit hoher Wahrscheinlichkeit brechen. Die Freiwilligen für die Versuche aus Kapitel 5.3 prallten mit deutlich geringeren Geschwindigkeiten gegen die Prüfkörper. Geringere dynamische Überhöhungsfaktoren sind die Folge. Da selbst bei diesem Extremszenario die übertragene Energie in der Größenordnung der Basisenergie liegt, ist diese Prüfeinwirkung für übliche Nutzung ausreichend.

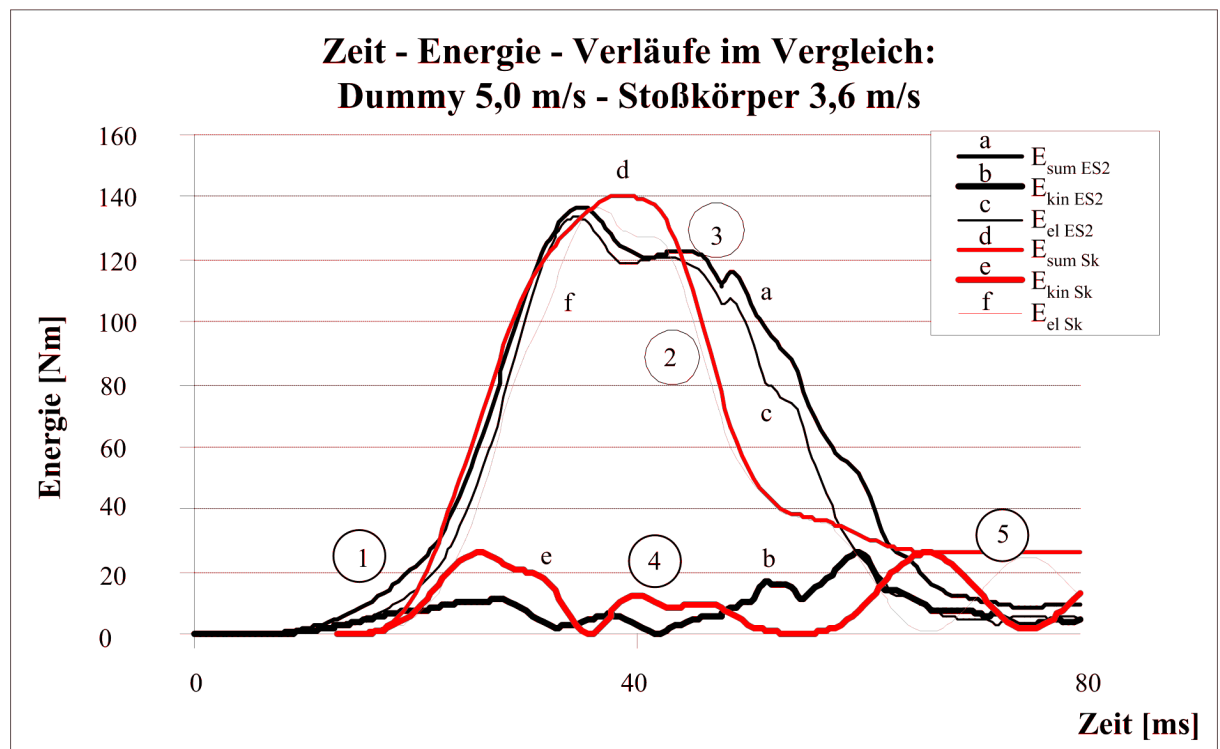


Bild 5.28: Vergleich der Energieübertragung zwischen Dummy und Stoßkörper nach DIN EN 12600

Wird die Kontaktkraft auf die Fläche nach Gleichung (3.7) für den Stoßkörper und Tabelle 5.11 für den Dummy umgerechnet, ergibt sich die in Bild 5.30 gezeichnete Situation. Die Einwirkungen des Dummy werden über eine viermal größere Fläche in die Glastafel eingeleitet.

Tabelle 5.9: Vergleich der übertragenen Energien: Dummy - Pendel

Modell	ES-2-Dummy	Stoßkörper nach DIN EN 12600		
Geschwindigkeit [m/s]	5,0	3,71	3,65	3,60
Energie [Nm]	139,0	149,6	144,0	140,3
Theoretische Fallhöhe [mm]	-	701	679	660

Tabelle 5.10: Kräfte die beim Anprall auf den Stoßkörper wirken

Modell	ES-2-Dummy	Stoßkörper nach DIN EN 12600
Geschwindigkeit [m/s]	5,0	3,6
Kraft [kN]	21,3	11,2

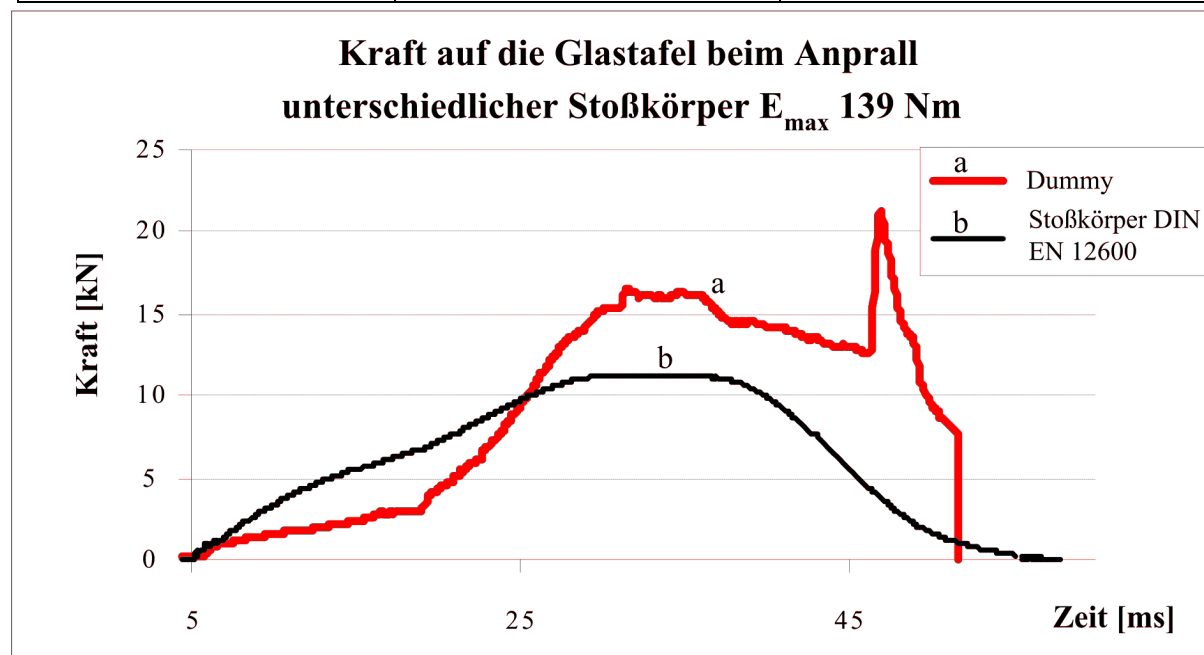


Bild 5.29: Vergleich der Kraftverläufe zwischen Dummy und Stoßkörper nach DIN EN 12600

Tabelle 5.11: Kontaktflächen des Dummys beim untersuchten Anprall

Körperteil	Kontaktfläche [mm ²]
Kopf	2.000
Schulter	15.000
Brustkorb	36.000
Oberschenkel	49.000

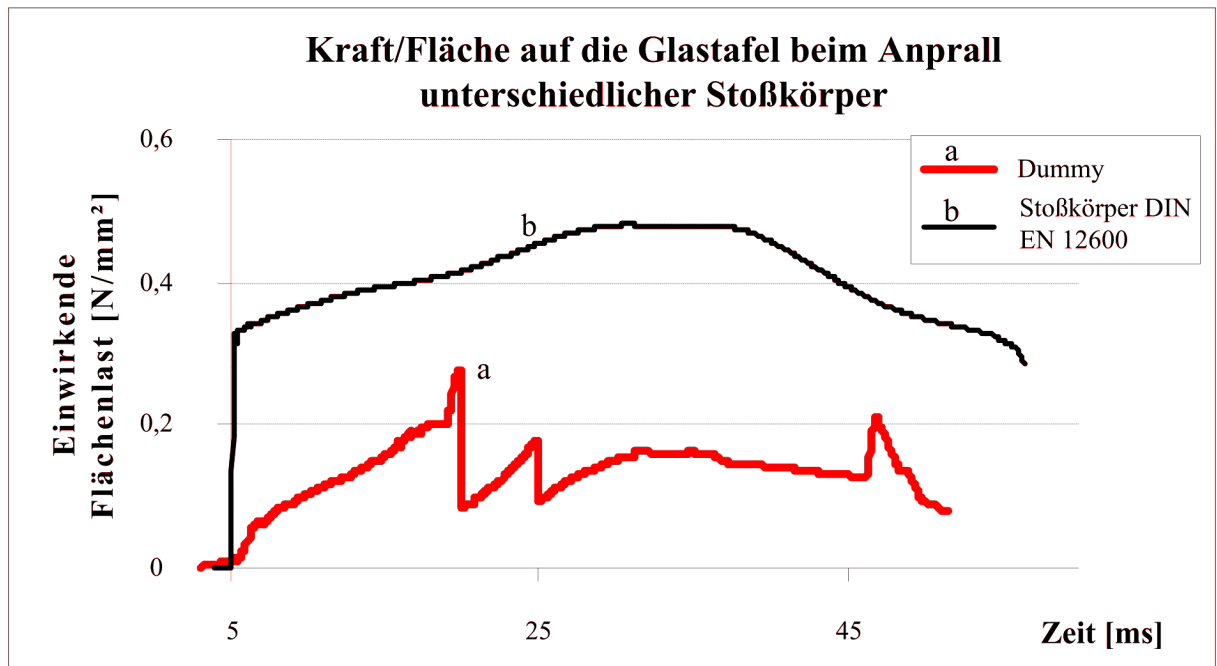


Bild 5.30: Vergleich der einwirkenden Kraft pro Fläche bei unterschiedlichen Stoßkörpern

5.4.4.1 Statistische Bewertung des Pendelschlages

Baurechtlich eingeführte Vorschriften erfüllen die Anforderungen der [GRUSIBA 81]. Die Versagenswahrscheinlichkeit einer Konstruktion, z. B. einer absturzsichernden raumhohen Verglasung nach den TRAV, liegt damit unter 10^{-6} . Mit dieser Versagenswahrscheinlichkeit lässt sich die Mindestsicherheit absturzsichernder Verglasungen abschätzen. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_R mit der diese Konstruktion den Grenzzustand der Tragfähigkeit einhält, berechnet sich nach [DIBt 86] Abschnitt 2, nach Formel (5.5):

$$\gamma_R = e^{(\beta \cdot \alpha_R - k) \cdot v} \quad (5.5)$$

Hierin sind:

Parameter	Beschreibung	Einheit
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert des Werkstoffs	[-]
β	Sicherheitsindex nach [GRUSIBA 81]	[-]
α_R	Beiwert für üblich streuende Werkstoffe	[-]
k	Fraktalfaktor	[-]
v	Variationskoeffizient der Werkstoffstreuungen	[-]

Der Fraktalfaktor beträgt für das Szenario „... Versagen bedeutet Gefahr für Leib und Leben ...“, nach [St 71] Abschnitt 4, $k = 3,09$. In den [UEAtc 82], Anhang II ist ein Hinweis gegeben, dass 2 % aller Bauteile einer Art einem Sicherheitsstoß standhalten müssen.

Damit ergibt sich nach den [GRUSIBA 81], Tabelle 2 eine Versagenswahrscheinlichkeit $p_f = 10^{-3}$; mit dem Grenzzustand der Tragfähigkeit 4,7 für Sicherheitsklasse 2, „... Gefahr für Menschenleben und/oder beachtliche wirtschaftliche Folgen...“ erhält man die Ergebnisse der Tabelle 5.12.

Tabelle 5.12: Sicherheiten absturzsichernder Verglasungen mit statistischen Betrachtungen

Szenario	β	p_f	α_R	v	γ_R
[TRAV 03]	4,7	10^{-6}	0,8	0,26	1,19
UEAtc	2,59	$2 \cdot 10^{-3}$	0,8	0,26	0,77

Dies bedeutet: raumhohe absturzsichernde Glastafeln, die nach den TRAV mit 900 mm Fallhöhe im Bauteilversuch geprüft werden, erfüllen die baurechtlich geforderte Absturzsicherung mit den oben genannten Annahmen mit einer Sicherheit von 1,19. Mit der tatsächlich geringeren Anprallwahrscheinlichkeit nach den UEAtc würde eine Absturzsicherung die üblichen Sicherheitsanforderungen des Bauwesens schon mit einer reduzierten Sicherheit mit 0,77 erfüllen. Würde die Fallhöhe mit diesen Faktoren linear skaliert, könnte sie mit dem Faktor $0,77/1,19$ auf 580 mm abgemindert werden. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Fallhöhen die infolge des Bemessungsvorschlages aus Kapitel 4.4 entstehen, liegen sie auf demselben Niveau. Damit sind die Energiebetrachtungen bestätigt.

5.4.5 Nachweis von Konstruktionen mit besonderen Anforderungen

Die Anforderungen der baurechtlich eingeführten Normen an absturzhemmende Konstruktionen sind allgemeingültig und unabhängig von der Situation am Bauvorhaben. Die Landesbauordnungen gestatten prinzipiell, dass die unteren Baurechtsbehörden im Genehmigungsverfahren auf örtliche Gegebenheiten reagieren und Verschärfungen oder auch Erleichterungen gegenüber bestehenden Vorschriften gewähren können.

Bei absturzsichernden Verglasungen gibt es bisher keine Kriterien, die eine Reduktion der Prüfenergie rechtfertigen würden. Wird die Absturzhemmung einer Glastafel mit einem Menschensimulator (Dummy) nachgewiesen, dient die Laufgeschwindigkeit, mit welcher der Dummy gegen die Glastafel prallt, als Eingangsgröße. Sie kann situationsbezogen (Tabelle im Anhang A 2) festgelegt werden.

Zur Hilfestellung, ob die Reduzierung der Einwirkungen verantwortet werden kann, können „Gefahrenbilder“, wie sie in [SIA 160] üblich sind, hilfreich sein. In Gedanken kann die Nutzungsdauer eines Bauwerkes wie im Film betrachtet werden. Alle möglichen Situationen, die auf die Konstruktion wirken können, wie Personen die auf einer Brüstung sitzen, Panikreaktionen im Rettungsweg, auftretendes Gedränge etc., müssen beachtet und in realistische Einwirkung umgesetzt werden.

Bei schmalen Fluren oder geringen Anlaufflächen, z. B. in Büroräumen, könnten die Einwirkungen sicherlich reduziert werden (siehe Bild A 18 im A 13). Rechnerisch könnte die Stoßhemmung dieser Glastafeln anstelle des Sicherheitsstoßes mit einem Gebrauchsstoß und den Teilsicherheitsbeiwerten nach der Tabelle 2.2 nachgewiesen werden. Andererseits sind auch

Situationen möglich, bei denen die Einwirkungen nach Tabelle 5.13 nicht ausreichen. Dies sind Sondersituationen, die nicht der üblichen Nutzung in Hochbauten entsprechen. Beispiele sind Tribünen in Fußballstadien, Fußgängerzonen mit Rollschuhfahrern, Einfriedungen im Tierpark. Die Einwirkungen nach 4.2.1 können zu gering sein. Hier ließen sich rechnerische Nachweise mit realistischen Stoßkörpern und Laufgeschwindigkeiten (Kapitel 0) nachweisen. Der Anprall ist mit einem realistischen Stoßkörper (Dummy) und den maximal möglichen Anprallgeschwindigkeiten zuzüglich den Sicherheitszuschlägen für streuende Werkstoffeigenschaften, Bauausführung etc. zu simulieren und die Glastafel nachzuweisen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird exemplarisch das Szenario eines Skateboardfahrers untersucht, der mit 30 km/h gegen eine Glastafel prallt. Das Szenario entspricht z. B. auch etwa einem Radfahrer in der Fußgängerzone. In der Berechnung wird die charakteristische Einwirkung ermittelt. Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 8,3 m/s werden auf die 1.050 mm x 2.056 mm große und 8 mm dicke Glastafel die in Tabelle 5.13 genannten Energien übertragen. Mit 538 Nm liegt die einwirkende Energie deutlich über der Basisenergie. Der herkömmliche Nachweis wäre nicht ausreichend, um diese Glastafel nachzuweisen (Bild 5.31). In Bild 5.32 ist die auf die Glastafel übertragene Energie abhängig von der Anprallgeschwindigkeit aufgetragen. Mit der Zunahme der Geschwindigkeit nimmt die Energie überproportional zu.

Es sei ausdrücklich davor gewarnt, das gewählte Szenario überzubewerten. Vermutlich ließe sich damit kaum ein Schaufenster oder eine verglaste Aufzugsanlage einer Fußgängerzone nachweisen. Unglücksfälle sind nicht bekannt, da dies ein sehr unwahrscheinliches Ereignis darstellt. Es muss kritisch und nicht leichtfertig abgewogen werden, ob diese Anprallgeschwindigkeit auftreten kann.

Tabelle 5.13: Die beim Anprall des Dummys auf die Glastafel übertragene Energie

Geschwindigkeit [m/s]	5,0	8,3
Energie [Nm]	139,0	538,3
γ_L^{27}	1,0	3,9

²⁷ Vorschlag zur Berücksichtigung der Laufgeschwindigkeit, Faktor γ_L abgeleitet aus der für unterschiedliche Anprallgeschwindigkeiten berechneten Energie $3,9 = \frac{538}{139}$

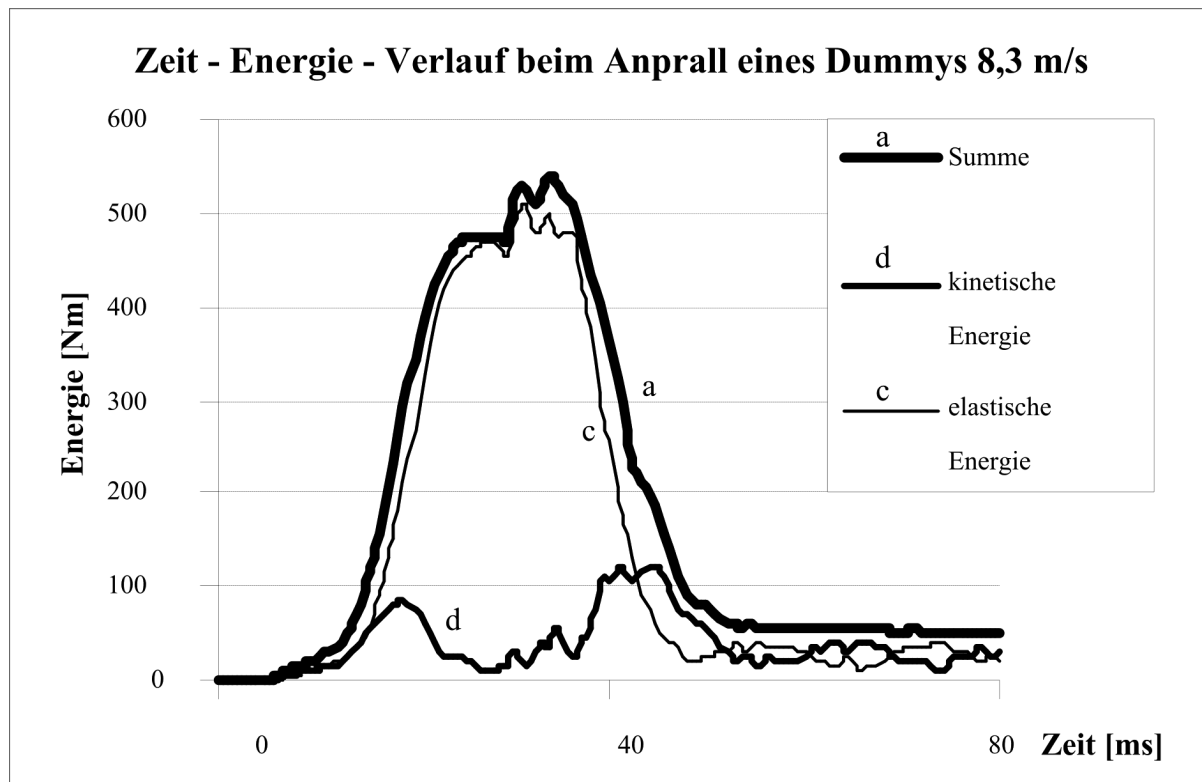


Bild 5.31: Energieverteilung beim Anprall eines Dummy mit einer Geschwindigkeit von 8,3 m/s (z.B. eines Skateboardfahrers)

Sind absturzhemmende Glastafeln, an die besondere Anforderungen gestellt werden nachzuweisen, so ist die Basisenergie im Bemessungskonzept nach Kapitel 4 anzupassen. Als Anhaltswert kann das Bild 5.30 dienen. Mit dem Eingangswert der zu erwartenden Anprallgeschwindigkeit kann die charakteristische Energie entnommen werden.

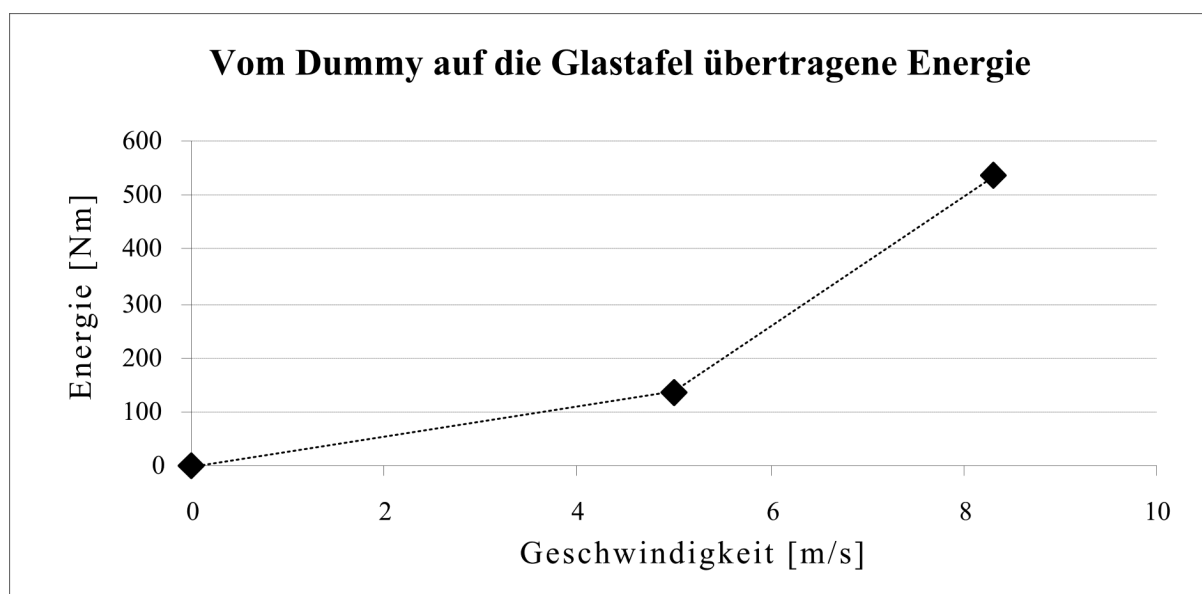


Bild 5.32: Geschwindigkeit – Energie – Diagramm des ES-2 Dummys, berechnet mit LS-DYNA

6 Zusammenfassung und Ausblick

Menschen können in Bauwerken mit Schritt- oder Laufgeschwindigkeiten gegen Glastafeln prallen. Dabei werden jedoch in aller Regel die bekannten biomechanischen Grenzwerte zum Abschätzen von Verletzungsrisiken nicht erreicht.

Beim Anprall eines Menschen auf eine Glastafel beeinflussen die Massen- und die Steifigkeitsverhältnisse den Stoßverlauf. Die Steifigkeit der Konstruktion setzt sich im konstruktiven Glasbau aus zahlreichen Komponenten wie Unterkonstruktion, Befestigungselemente, Pressleisten, Werkstoffparameter, Auftreffort etc. zusammen. Jeder Anprall hat damit seinen eigenen charakteristischen Verlauf. Die Einflüsse der Bauprodukte wurden in Kapitel 3 diskutiert.

Es wurde dargestellt, dass mit einem Zwei- oder Dreimassenschwingermodell die prinzipiellen Effekte des Stoßes untersucht werden können. Zur Kalibrierung von FE – Modellen an ausgesuchten Simulationen (z. B. der starren Wand) sind diese Hilfsmittel wertvoll. Da aber zusätzlich nichtlineare Effekte der Massen- und Steifigkeitsverteilung des Prüfkörpers den Stoßverlauf beeinflussen, lässt sich auf der Basis des Zweimassenschwingers kein wirtschaftliches Bemessungskonzept für Glastafeln entwickeln.

Für die experimentellen Untersuchungen in [Bu 04a] stand nur eine begrenzte Probenanzahl zur Verfügung. Dennoch belegen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuchsauswertungen erstmals einen dynamischen Elastizitätsmodul von Einscheiben-Sicherheitsglas unter Stoßeinwirkung (siehe 3.9). Ergänzende Versuche zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls unter Stoßeinwirkung bei anderen Glasarten (SPG, TVG) wären für die Bemessung wünschenswert.

Wenn die Steifigkeitszunahme des Werkstoffs Glas auch bei den unter Windeinwirkung auftretenden Belastungsgeschwindigkeiten und –dauern mit Versuchen nachgewiesen werden könnte, ließen sich auch Fassadenglastafeln ohne absturzsichernde Funktion zukünftig kostengünstiger dimensionieren.

Die Glastafeln wurden hier nur bis zum Erreichen der charakteristischen Kurzzeitfestigkeit ausgenutzt. Zusätzliche Tragreserven ließen sich mit Simulation der Rissentwicklung im Glas und einer Abschätzung des daraus resultierenden Einflusses auf das Resttragvermögen nachweisen. Dazu sind weitere experimentelle Untersuchungen als Grundlage zur Validierung entsprechender Werkstoffmodelle erforderlich.

Dem Autor liegen zahlreiche FE – Simulationen von Pendelschlagversuchen ohne Validierung der Eingabeparameter vor. Die Abweichungen zwischen Versuch und Rechnung bestätigen eine ungenügende Modellbildung bzw. Simulation. So wird die bisherige Haltung der Bauaufsicht, die rechnerischen Nachweise lediglich als Stand des Wissens einzustufen und den allgemeinen rechnerischen Nachweis abzulehnen, verständlich. Mit der vorliegenden Arbeit wurden die auftretenden Stoßeffekte erläutert und es wird gezeigt wie ein validiertes FE – Modell aufgebaut sein muss. Die Berechnungsergebnisse der Simulation des Pendel-

schlagversuches mit einem geeigneten (validierten) FE-Modell aus Kapitel 3.5 wurden mit experimentellen Untersuchungen [Bu 04a] bestätigt. Mit solchen Modellen lässt sich der Pendelschlagversuch mit hoher Aussagewahrscheinlichkeit simulieren. Der Autor hat die Hoffnung, dass die Bauaufsicht damit auf Erfahrungen zurückgreifen kann, die zur Anerkennung der rechnerischen Simulation des Anpralls eines elastischen Körpers auf Glastafeln ermöglichen. Auch bei Sondersituationen lassen sich kostenintensive experimentelle Untersuchungen an Originaltafeln auf wenige Versuche zur Bestimmung eventuell fehlender charakteristischer Festigkeiten, z. B. einer besonderen Haltekonstruktion, reduzieren.

Gestützt auf die Erfahrungen mit gebauten absturzsichernden Verglasungen und durchgeführten Pendelschlagversuchen wird in Kapitel 4 ein neues Bemessungskonzept für Glastafeln vorgeschlagen. Damit können absturzhemmende Glastafeln wirtschaftlich und mit einem einheitlichen Sicherheitsniveau rechnerisch nachgewiesen werden. Der Bemessungswert der Energie für absturzhemmende Glastafeln wird in Kapitel 4.2.1 vorgestellt. Versuchsgläubigen Personen mag diese Einwirkung gering erscheinen. Einschätzungen rein aus „Gefühlen“ oder „Vermutungen“ heraus sind kritisch zu betrachten und als Bemessungsgrundlage im Bauwesen nicht fundiert. Die Vorgaben wurden aus zahlreichen Versuchen generiert, die Grundlagen der UEAtc-Leitlinie und der ETB-Richtlinie sind. Beide Regeln sind seit Jahren Stand der Technik. Daraus wurden die [ETB 87] für alle Werkstoffe außer Glas entwickelt. Unfälle mit Todesfolge bei Ansatz dieser Einwirkung sind nicht bekannt. Beim Nachweis muss die tatsächlich auf die Glastafel wirkende Energie berücksichtigt werden. Dies kann nur mit einer FE – Berechnung sichergestellt werden, in der nach der Berechnung jeweils die Summe der übertragenen elastischen und kinetischen Energie kontrolliert wird. Für die vorliegende Arbeit wurde ein Auswertungsmodul für das FE – Programm SJ MEPLA geschrieben. Auch beim Pendelschlagversuch entspricht die Ausgangsenergie infolge der Fallhöhe nicht der Energie, die auf die Glastafel übertragen wird, da sich die Reifen des Stoßkörpers zusammendrücken und dabei Energie speichern. Entsprechende Beispiele sind in Anhang A 15. aufgearbeitet.

Die charakteristische Einwirkung für das Bemessungskonzept wird anhand eines Beispiels (siehe 5.4) überprüft. Dabei stößt ein Dummy mit einer Laufgeschwindigkeit von 5 m/s rechnerisch gegen eine Glastafel. Hiermit ist aus Sicht des Autors die für absturzsichernde Konstruktionen nach [UEAtc 82] Abschnitt 2.2 geforderte Basisenergie als realistische obere Grenze bestätigt. Das Bemessungskonzept ist variabel und lässt sich an verschiedene Montagequalitäten oder auch Einwirkungsszenarien anpassen. Die absturzhemmende Wirkung einer Glastafel kann damit auf einem einheitlichen Sicherheitsniveau nachgewiesen werden.

Das vorgestellte Konzept kann für beliebig gelagerte absturzhemmende Verglasungen mit Punktlagern oder auf tragende Verklebungen erweitert werden. Detailfragen wie z. B. Alterungseinflüsse der Verklebung sind noch zu klären, können aber ebenfalls über Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden.

7 Schrifttum

- [A 08] Glas im Bauwesen; Technische Grundlagen für die Beurteilung von Sicherheitsglas und Glas mit Sicherheitseigenschaften, 2. Auflage, Ausgabe 08/2003, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 17A Allgemeine technische Angelegenheiten, Mandellstraße 38, 8010 Graz
- [AF 73] US Air Force, MIL-S-94 79 B; Seat systems, upward ejection, general specification, 1973
- [AF 85] US Air Force, MIL-E-87235; Aircraft emergency escape, 1985
- [ANSI 97-75] American National Standard ANSI Z 97.1-1975
- [AN 98] Handbuch für ANSYS von SAS IP; Version 5.5, 1998
- [ASR12/1] Arbeitsstätten-Richtlinie (ASR 12/1-3) "Schutz gegen Absturz und herabfallende Gegenstände"
- [Ba 80] Balkow K., von Bock H., Krewinkel H., Rinkens R.; Glas am Bau – Technischer Leitfaden, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1980
- [Ba 82] Battermann, Kohler; Elastomere Federung, elastische Bettung, Ernst & Sohn, 1982
- [BG 91] Merkblatt für Treppen, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Ausgabe April 1991
- [Bh 97] Berkhemer H.; Grundlagen der Geophysik 2. Auflage, Wiss. Buchgesellschaft Verlag Darmstadt, 1997
- [Bo 00] Bohmann D.; Verlauf menschlicher Körperstoß Energiesatz Kapitel I, Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbund Glastafeln, 2000, VDI-Berichte Nr. 1527
- [Bo 99] Bohmann D.; Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbund Glastafeln, Dissertation RWTA Aachen 1999
- [Br 01] Breckner W.; Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas unter Stoßbelastung nach DIN EN 12600, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, unveröffentlicht, 2001
- [Br 04] Brendler S., Bericht zur Parameteridentifikation für ein nichtlineares Materialgesetz zur Simulation von Gummi mit dem Programmsystem LS-DYNA, (unveröffentlicht) November 2004
- [Br 04a] Brendler S., Haufe A., Ummenhofer T.; A Detailed Numerical Investigation of Glass subjected to the Standard Pendulum Test, LS-

DYNA Forum, 2004 Bamberg, Deutschland

- [Br 04b] Brendler S., Haufe A., Ummenhofer T.; Rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung an absturzsichernden monolithischen Verglasungen und Mehrscheiben-Isolierverglasungen: Simulation des Pendelschlagversuches gemäß DIN EN 12600; Bauingenieur 3/2004, S. 123-130
- [Br 04c] Brendler S., Umfrage bei akkreditierten Prüfstellen zur Auslegung von allgemeinen baurechtlichen Prüfzeugnissen, (unveröffentlicht) November 2004
- [Br 04d] Brendler S.; Rechnerische Vorabuntersuchung der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung, Bericht beim DIBt hinterlegt (29.06.2004)
- [Br 04e] Brendler S.; Rechnerische Vorabuntersuchung der Tragfähigkeit von Verbund-Sicherheitsglastafeln von allseitig gelagerten Verbund-Sicherheitsglastafeln unter stoßartiger Einwirkung, Bericht beim DIBt hinterlegt (14.08.2004)
- [Br 89] Brünner W., Mellmann G., Struck W.; Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen, Bundesanstalt für Materialprüfung Bericht Nr. 163, 1989
- [BRL] Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C in der aktuell gültigen Fassung. Jährliche Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)
- [BS 6 206] Impact performance requirements for flat safety glass and safety plastics for use in buildings Barriers in and about buildings – British Standard 6206:1981
- [BS 6180] Barriers in and about buildings – Code of practice British Standard 6180:1999
- [Bu 02] Bugger S.; Weiterführende Untersuchungen an Verbundsicherheitsglasscheiben, Versuchstechnische Untersuchungen mit verschiedenen Belastungsszenarien unter Berücksichtigung der Temperatureinwirkung, Diplomarbeit an der Fachhochschule München, 2002
- [Bu 04] Bucak Ö., Lorenz A.; G1 Grundsatzuntersuchungen zu Pendelschlagversuchen; Prüfbericht, Labor- für Stahl und Leichtmetallbau, Fachhochschule München, Juli 2004 (unveröffentlicht)
- [Bu 04a] Bucak Ö., Lorenz A.; G2 Grundsatzuntersuchungen zu Pendelschlagversuchen; Prüfbericht, Labor- für Stahl und Leichtmetallbau, Fachhochschule München, Dezember 2004 (unveröffentlicht)
- [Bu 04b] Bucak Ö.; Bauteilversuche zur Ermittlung der Schultersteifigkeit

- beim Anprall an Glas, Forschungsbericht, Fachhochschule München, 2004
- [LTB] Liste der Technischen Baubestimmungen am Bsp. Baden-Württemberg: Bekanntmachung des Wirtschaftsministeriums über die Liste der Technischen Baubestimmungen, aktuelle Fassung wird jährlich im Gesetzesblatt veröffentlicht.
- [Ch 96] Charlier H.; Absturzsichernde Verglasung, Glas im Bauwesen - Überkopfverglasungen, Fassadenverglasungen, Sonderfälle, 1996, Vortrag VWA Seminar Herbst 1996, Stuttgart
- [Ch 97] Charlier H.; Sitzungsvorlagen 130. Sitzung FK Bautechnik/ 1997/ Bauaufsichtliche Anforderungen an absturzsichernde Verglasungen, Fassung Juni 1997, Niederschrift der 130. FK-Sitzung
- [Cl 69] Clauser C. E., Mc Conville J.T., Young J. W., Weight; Volume and centre of mass of segments of the human body. AMRL Technical Report, 69-70. Wright Patterson Air Force Base, Ohio,(1969)
- [DIBt 86] Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren, Fassung Mai 1986, DIBt
- [DIN 1024-2] DIN 18024-2; Barrierefrei Bauen Teil 2 Öffentlich zugängliche Gebäude und Arbeitsstätten Planungsgrundlagen, Ausgabe 1996-11
- [DIN 1055-100] DIN 1055-100; Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Ausgabe: 2001-03
- [DIN 1055-3] DIN 1055 Blatt 3; Lastannahmen für Bauten Verkehrslasten, 1971:06
- [DIN 1249-10] DIN 1249 Teil 10; Flachglas im Bauwesen; Chemische und physikalische Eigenschaften, Ausgabe 1990-08
- [DIN 18065] DIN 18065; Gebäudetreppen Definitionen, Maßregeln, Hauptmaß, Ausgabe 2000-01
- [DIN 4103] DIN 4103-1; Nichttragende innere Trennwände; Anforderungen, Nachweise, Ausgabe 1984-07
- [DIN 52337] DIN 52337; Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen – Pendelschlagversuche; Berlin, Ausgabe 1985-09
- [DIN 52338] DIN 52338; Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen, Kugelfallversuch für Verbundglas, Ausgabe 1985-09
- [DIN EN 12600] DIN EN 12600; Glas im Bauwesen – Pendelschlagversuch - Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas; Deutsche Fassung, Ausgabe: 2003-04
- [DIN Fb 101] DIN-Fachbericht 101; Einwirkungen auf Brücken, 2003-03

- [DIN13474] DIN EN 13474-1; Bemessung von Glastafeln Teil 1: Allgemeine Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung Deutsche Fassung prEN 13474-1, April 1999
- [DY 04] DYNA*more*; Neues Dummy-Modell von DYNA*more*, Pressemeldung 2/2004 über FAT ES-2 dummy, www.es-2.com 2004
- [EN 81] DIN EN 81-1/A1; Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen - Teil 1: Elektrisch betriebene Personen- und Lastenaufzüge; Änderung A1; Deutsche Fassung EN 81-1:1998/prA1:2000, Ausgabe: 2000-07
- [Es 82] Eschenfelder D.; Vorbemerkungen zur Beanspruchung von Bauteilen, denen Sicherungsfunktionen gegen Absturz zugewiesen werden, Mitteilungen Institut für Bautechnik (IfBt) 3/1982
- [ETB 87] ETB – Richtlinie "Bauteile, die gegen Absturz sichern" DIBT Mitteilungen 2/87 S. 49
- [E-TRAV 01] Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen - Entwurfsfassung März 2001, Mitteilungen DIBT 3/2001, S. 86 bis 93
- [Fe 93] Feldmeier F., Huber K.; Forschungsbericht Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen - Vergleichende Untersuchungen zu Pendelschlagversuchen auf Flachglas im Bauwesen - Pendelschlagversuche Teil 1; Institut für Fenstertechnik Rosenheim 03.1993
- [Fe 96] Feldmeier F., Huber K.; Abschlußbericht Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen - Vergleichende Untersuchungen zu Pendelschlagversuchen auf Flachglas im Bauwesen – Pendelschlagversuche Teil 1; Institut für Fenstertechnik Rosenheim 06.1996
- [Fi 00] Fink A., Ein Beitrag zum Einsatz von Floatglas als dauerhaft tragender Konstruktionswerkstoff im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt Institut für Statik, Dissertation, 2000
- [GC 03] GS 2 : Garde – corps non traditionnels en produits verriers encastrés en pied – Note d’information 2 (Cahiers CSTB 3034 avril 1998) version 132 – juin 2003
- [Go 61] Goldman, D.E., von Gierke, H.E.: Effects of Shock and Vibration on Man. Shock and Vibration Handbook, Vol. 3 McGraw-Hill Book Company, New York 1961
- [Gö 98] Götz C.; Entwicklung eines Finite – Elemente – Modells des menschlichen Schädels zur Simulation von Stößen, Universität Tübingen, 1998
- [Gr 03] Gräf H.; Untersuchungen zum Tragverhalten von Verbund-Sicher-

- heitsglas bei linienförmiger und punktueller Lagerung, 2003, Technische Universität München, Dissertation, 3/2003
- [Gr 81] Gränzer M.; Grundbegriffe der Statistik für Bauingenieure, Landesstelle für Baustatik Baden-Württemberg, 1981 (unveröffentlicht)
- [Gr 87] Gruber K., Denoth J., Stuessi E., Ruder H.; The Wobbling Mass Model, International Series on Biomechanics 6B, (ed. B: Jonsson) Human Kinetics Publisher, Champaign, III: 1095-1099, (1997)
- [Gr 87a] Gruber K.; Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Kräfte im Knie- und Hüftgelenk bei sportlichen Bewegungsabläufen mit hohen Beschleunigungen. Dissertation, Tübingen, (1987)
- [Gr 93] Gruber, Hospach, Ruder, Subke, Widmayer; Optimierung von Aufbaueinrichtungen Abschlussbericht, Lehrstuhl für Theoretische Astrophysik der Universität Tübingen, 1993
- [GRUSIBA 81] Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen, Beuth, Berlin, 1981
- [GUV 00] GUV 65.3; Sicherheit bei Bau und Errichtung, Mehr Sicherheit bei Glasbruch, Gesetzliche Unfallversicherung, August 2000
- [He 03] F. Heyder, Simulation von Pendelschlagversuchen an Glas mittels FEM, Stahlbau 72 (2003) (12)
- [He 91] Hess W.; Sprint - Lauf - Gehen, Sportverlag, Berlin 1991
- [He 97] Heine S., Schönekas A.; Entwicklung eines Simulationsmodells auf der Basis von MADYMO für den Motorrad-Fußgänger-Unfall unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Kollisionsversuchen, Gemeinschafts-Diplomarbeit Nr. 6/97, Technische Universität Berlin, Institut für Straßen- und Schienenverkehr (Fahrzeugtechnik), 1997 <http://www.kfz.tu-berlin.de>
- [Hi 96] Hiermaier S.; Numerische Simulation von Impaktvorgängen mit einer netzfreien Lagrangemethode (Smooth Particle Hydrodynamics), Universität der Bundeswehr München 1996
- [Ho 93] Hospach F.; Computersimulationen von Abstürzen mittels biomechanischer Ganzkörpermodelle, Fakultät für Physik, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 1993
- [Hu 95] Huber K.; Entwicklung eines Stoßkörpers für Pendelschlagversuche, 34867, IFT Rosenheim Institut für Fenstertechnik Fenstertage 1995 (13)
- [IfBt 82] Mitteilungen Institut für Bautechnik (IfBt) 3/1982
- [Ki 99] Kipf T. ; Rechnerische Simulation des Pendelschlagversuches mit

ANSYS, Internet www.idtk.de, 1999

- [Kn 99] Knobloch V.; Rechnerische Simulation des Pendelschlagversuchs – Kontaktproblem, Diplomarbeit, Institut für Baustatik der Universität Stuttgart Prof. E. Ramm, unveröffentlicht, 1999
- [Ko 04] Kolling S., Sonntag B., Nguyen N. B.; Zur Simulation von Sicherheitsglas unter stoßartiger Belastung – Teil I: FE – Modelle für Einscheiben- und Verbundsicherheitsglas, - Teil II: Validierung eines FE – Modells für Verbundsicherheitsglas, 3. LS-DYNA Forum 2004
- [Kü 01] Kühlmeyer M.; Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure, Springer-Verlag (VDI-Buch), 2001
- [Ku 04] Kühnemann E., Werner G.; Verwendung von Bauprodukten und Anwendung von Bauarten des Ingenieurholzbaus Holzbaukalender 2004
- [Ku 85] Kuchling H.; PHYSIK Formeln und Gesetze, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1985
- [LfB 03] LfB Merkblatt G3; Zusammenfassung der wesentlichen Anforderungen an absturzsichernde Verglasungen im Rahmen von Zustimmungen im Einzelfall, (Fassung 16.05.2002)
- [Li 71] Limberger, E.; Ein Feder – Masse – Feder Schwinger zur Lösung von Stoßproblemen, Materialprüfung 13 (1971), S. 342-345
- [Li 72] Limberger E., Struck W.; Stoßartige Beanspruchungen von Bauteilen und ihre rechnerische Simulation an mechanischen Modellen, Die Bautechnik 11/1972, S 384 -388
- [Li 75] Limberger, E.: Vereinfachte Ermittlung der Beanspruchung von Bauteilen infolge Massestoß unter Berücksichtigung elastisch-plastischen Tragverhaltens. Die Bautechnik 52 (1975) 5. 42-48
- [LS-DYNA] LS-DYNA Keyword Users Manual 2002, Livermore Software Technology Company, California, USA.
- [Ma 00] Maier W., Weiler P.; Absturzsicherung und Resttragfähigkeit Vom experimentellen zum rechnerischen Nachweis, VDI Berichte Nr. 1527, 2000
- [Ma 03] Maier F., Gränzer M.; Innovative Bauprodukte und Bauarten Wann benötigt man eine Zustimmung im Einzelfall?, DETAIL Praxis Transluzente Materialien 2003
- [Ma 92] Mattern; Optimierung von Auffangeinrichtungen Teil I bis III, Institut für Rechtsmedizin Uni Heidelberg, 1992?
- [MBAU 02] Merkblatt Glas und Acrylglas im Standbau innerhalb von Messen,

-
- Arbeitskreis Technische Richtlinien Stand, 12.04.2002, Internet
- [MBO 02] Musterbauordnung (MBO) – Fassung November 2002 der Bauministerkonferenz
- [Ng 04] Nguyen N., Haufe, A. Kolling S., Sonntag B.; Zur Simulation von Sicherheitsglas unter stoßartiger Belastung Teil I: FE – Modelle für Einscheiben- und Verbundsicherheitsglas, LS-DYNA Forum, 2004 Bamberg, Deutschland
- [Ni 76] Nilsson L; Impact Loads Produced by Human Motion, Part 1: Background and experimental investigation, Schweden 1976
- [Ni 80] Nilsson L; Impact Loads Produced by Human Motion, Part 2: Requirements for Structures and Methods of test, Schweden 1980
- [Pi 99] Pilkington Flachglas AG; Das Glas-Handbuch 1999
- [Pr 04] Proske D.; Katalog der Risiken, Risiken und ihre Darstellung; Die Deutsche Bibliothek CIP; ISBN 3-00-014396-3, Dresden 2004
- [Qu 02] Quint M.; Dynamische Berechnungen am Beispiel von Glaskonstruktionen, 19.-20.04.2002, Anwenderseminar SOFISTIK Nürnberg
- [Re 93] Optimierung von Auffangeinrichtungen – Biomechanische Beanspruchungsgrenzen des Menschen Abschlussbericht, Institut für Rechtsmedizin der Universität Heidelberg 1993
- [Rü 01] Rück R. Völkel G.E.; Beanspruchung von 4-seitig linienförmig gelagerten Isolierglaselementen bei Stoßbeanspruchung, Forschungsbericht Nr. 25-30438-1, Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart 2001
- [Rü 02] Rück R., Reinhardt, H.-W.; Verhalten von Mehrscheiben-Isolierglas bei statischer und stoßartiger Einwirkung, Bauingenieur - 10/2002
- [Rü 02a] Rück R.; Tragverhalten von Mehrscheiben-Isolierglas, Dissertation, Otto-Graf-Institut Universität Stuttgart, 2002
- [Rü 99] Rück R. Völkel G.E.; Untersuchung von vierseitig linienförmig gelagerten Scheiben bei Stoßbeanspruchung, Forschungsbericht Nr. 25-20438, Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart 1999
- [Rü 99a] Rück R.; Stoßbeanspruchung einer vierseitig linienförmig gelagerten Verglasung durch menschliche Körper und Ersatzkörper Festschrift zum 60. Geburtstag Dr.-Ing. H. W. Reinhardt Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen - FMPA BW (Otto-Graf-Institut), Stuttgart 1999
- [Sc 00] Schmiedmayer B.; Unfallbiomechanik, Vorlesungsscript, Uni Wien, 2000
- [Sc 02] Schneider J., Bohmann D., Glasscheiben unter Stoßbelastung – Expe-

- rimentelle und theoretische Untersuchungen für absturzsichernde Verglasungen bei weichem Stoß, Bauingenieur, 2002
- [Sc 03] Schuler C.; Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbund-Sicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur und Belastung, Technische Universität München, Dissertation, 3/2003
- [Sc 05] Schuler C., Koch S., Binder M., Bucak Ö.; Vergleichende Untersuchungen zu Stoßbeanspruchungen beim Bauvorhaben Zoo Wuppertal, Fachhochschule München (unveröffentlicht) 2005
- [Sc 93] Schmid, Feldmeier F., Huber K.; Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen – Vergleichende Untersuchungen zu Pendelschlagversuchen auf Flachglas im Bauwesen Pendelschlagversuche Teil 1, Forschungsbericht, Institut für Fenstertechnik e.V., 1993
- [Sc 96] Schmid, Feldmeier F., Huber K.; Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen – Vergleichende Untersuchungen zu Pendelschlagversuchen auf Flachglas im Bauwesen Pendelschlagversuche Teil 2, Abschlussbericht, Institut für Fenstertechnik e.V., 1996
- [Sc 98] Schneider H.; Rechnerische Simulation des Pendelschlagversuches mit ANSYS, Landesstelle für Bautechnik (unveröffentlicht), 1998
- [Sc 99] Schlick O.; Rechnerische Simulation des Pendelschlagversuchs – Dynamisch beanspruchter Glasplatten, Diplomarbeit, Institut für Baustatik der Universität Stuttgart Prof. E. Ramm, unveröffentlicht, 1999
- [Sc 01] Schneider J., Festigkeit und Bemessung punktgelagerter Gläser und stoßbeanspruchter Gläser, Technische Universität Darmstadt Institut für Statik, Dissertation, 2001
- [Se 01] Sedlacek G.; Zertifizierung des FE – Programms SJ MEPLA durch Vergleichsberechnungen und analytische Lösungen, 06.08.2001
- [Se 99] Sedlacek G., Blank K., Laufs W., Güsken J.; Glas im Konstruktiven Ingenieurbau, Ernst & Sohn, 1999
- [Si 02] SIGaB; Sicherheit mit Glas, Merkblatt des Schweizerischen Institutes für Glas am Bau 2002
- [SIA 160] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SIA-NORM 160.005; Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen aus Tragwerke, 1995
- [SIA 358] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SIA-NORM 358, Geländer und Brüstungen, 1996

-
- [SJ 01] Programmsystem SJ MEPLA von SJ Software, Aachen; Version 2.5.0, 2004
- [SL 02] Institut „Sicher Leben“ Bundesministerium für Gesundheit und Frauen Ölzeltgasse 3, A-1031 Wien, Unfallstatistik 2002
- [So 04] Sonntag B., Haufe A., Kolling S., Nguyen N.; Zur Simulation von Sicherheitsglas unter stoßartiger Belastung Teil II: FE – Modelle für Einscheiben- und Verbundsicherheitsglas, LS-DYNA Forum, 2004 Bamberg, Deutschland
- [St 67] Struck, W., Böhmert, W.; Gedanken und Versuche zum Ermitteln von Prüfverfahren für die Beurteilung des Verhaltens von Wandtafeln gegenüber stoßartiger Beanspruchung, Berichte aus der Bauforschung, H. 50, S. 5-30, Berlin 1967
- [St 71] Struck W.; Zur Frage der Sicherheit bei der Beurteilung von Bauteilen nach Versuchsergebnissen, Die Bautechnik, 1971
- [St 71a] Struck, W., Böhmert, W.; Verfahren zum Abschätzen der Beanspruchung in nichttragenden Wandteilen, die durch gegenprallende Menschen stoßartig belastet werden, Die Bautechnik 48 (1971), 5. S. 62-64
- [St 76] Struck W.; Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen, Vorschlag für ein Prüfverfahren, BAM Berichte Nr. 37 Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung, 1976
- [St 77] Struck W.; Massestoß auf leichte Bauteile im Hochbau; Hinweise auf neue Beurteilungsmöglichkeiten, Die Bautechnik 2/1977 S. 55-60
- [St 78] Struck W., Limberger E.; Die Energieübertragung auf leichte, nichttragende Bauteile beim Stoß mit einem Glaskugelsack im Vergleich zum Schulterstoß, Mitteilungen IfBt 5/1978 (37)
- [St 82] Struck W., Limberger E.; DIN 4103 - Nichttragende Trennwände Untersuchungen zur Festlegung des Anforderungsniveaus - statische und stoßartige Belastungen, Die Bautechnik 11/1982
- [St 94] Struck W., Limberger E.; Der Prüfkörper Glaskugelsack – eine erweiterte Modellvorstellung, Mitteilungen Institut für Bautechnik 5/1994
- [Sz 58] Szabó I.; Höhere Technische Mechanik, Springer-Verlag, 1958
- [TRAV 03] Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen - Fassung Januar 2003, Mitteilungen DIBt 02/2003, S. 58 bis 59

- [TRLV 98] Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen, Entwurfsfassung August 1998, Deutsches Institut für Bautechnik
- [TÜV 03] Nachweise für vertikale Aufzugsverglasungen; TÜV Süddeutschland 29.10.2003
- [TÜV 04] Kurzinfo: Aufzugsverglasungen in Baden-Württemberg; TÜV Süddeutschland; 31.03.2004
- [UEAtc 82] UEAtc-Leitlinien; Stöße auf undurchsichtige, senkrechte Bauteile Fassung:1982, Schriften des DIBt, Reihe UL, Heft 46
- [Um 04] Ummenhofer T.; Auswertung von Anprallszenarien von Menschen auf Kraftmessdosen, Institutsbericht unveröffentlicht, 2004
- [We 04] Werner F.; Eine Vollglaskonstruktion – Möglichkeiten und Probleme, Stahlbau 11/2004, S. 893 bis 900
- [Wi 99] Winkelmann K.; Beurteilung von Sicherheit und Risiko bei Vertikalverglasungen, Vertieferarbeit, Institut für Statik TU Darmstadt, 1999
- [Wö 00] Wörner J.-D., Schneider J., Giebenhain S., Sicherheit von Glaskonstruktionen, Darmstädter Statik-Seminar, 2000
- [Wö 00a] Wörner J.-D., Schneider J.; Abschlußbericht zur Durchführung von Versuchen zum weichen Stoß mit dem Pendel nach DIN EN 12600, Institut für Statik, Darmstadt, 2000
- [Wö 99] Wörner J.-D., Schneider J.; Zwischenbericht zur Durchführung von Versuchen zum weichen Stoß mit dem Pendel nach DIN EN 12600, Institut für Statik, Darmstadt, 1999

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verwendete Abkürzungen	XIII
Tabelle 2:	Einheiten	XIV
Tabelle 3:	Werkstoffkennwerte	XVII
Tabelle 2.1:	γ_M -Teilsicherheitsfaktoren beim „Sicherheitsstoß“, Werte nach [UEAtc 82]	18
Tabelle 2.2 :	γ_M -Teilsicherheitsfaktoren beim „Gebrauchsstoß“, Werte nach [UEAtc 82]	18
Tabelle 2.3:	Charakteristische Anprallenergien.....	28
Tabelle 2.4:	Energien beim Bauteilversuch	30
Tabelle 2.5:	Streuungen der Pendelschlagversuchsergebnisse mit 450 mm Fallhöhe [Wö 00a]	37
Tabelle 2.6:	Streuungen der Pendelschlagversuchsergebnisse mit 700 mm Fallhöhe [Wö 00a]	37
Tabelle 2.7:	Streuungen der Pendelschlagversuchsergebnisse [Um 04]	38
Tabelle 2.8:	Streuung der Pendelschlagversuchsergebnisse [Sc 05]	38
Tabelle 3.1:	Schwingungsdauer des Pendels (8 Messungen)	47
Tabelle 3.2:	Massenträgheitsmomente des Pendels.....	49
Tabelle 3.3:	Eingangswerte für die Berechnung des Zweimassenschwingers	55
Tabelle 3.4:	Faktoren η zur Ermittlung der generalisierten Masse von allseitig liniengelagerten Rechtecktafeln bei mittigem Auftreffort	57
Tabelle 3.5:	Faktor η zur Berechnung der generalisierten Masse einer rechteckigen Glastafel, allseitig liniengelagert, mit den Abmessungen 7,75 x 1.050 x 2.056 mm (t x b x h _G)	57
Tabelle 3.6:	Eingangswerte Beispiel 1.....	65
Tabelle 3.7:	Eingangswerte Beispiel 2.....	65
Tabelle 3.8:	Experimentell und rechnerisch ermittelte Energieübertragungsraten bei 450 mm Fallhöhe	66
Tabelle 3.9:	Stoßkörperkräfte bei Stößen gegen die starre Wand	69
Tabelle 3.10:	Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 1,0 m x 2,0 m – 2 x 4 SPG.....	80
Tabelle 3.11:	Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 1,0 m x 2,0 m – 2 x 8 SPG.....	80

Tabelle 3.12:	Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 1,0 m x 2,0 m – 2 x 8 SPG	80
Tabelle 3.13:	Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 2,0 m x 3,0 m – 2 x 8 SPG	80
Tabelle 3.14:	Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten, Glastafel: 2,0 m x 3,0 m – 2 x 8 SPG	81
Tabelle 3.15:	Massen- Steifigkeitsverhältnisse der Glastafeln	86
Tabelle 3.16:	Verwendete Elemente im LS-DYNA Modell	95
Tabelle 3.17:	Auftreffgeschwindigkeiten und Kraftstoß, TRAV – FE – Modell	105
Tabelle 3.18:	Stoßkörperkräfte beim Stoß gegen ESG t = 7,75 mm	107
Tabelle 3.19:	Kräfte des Pendels beim Stoß auf MSI 8/16/8	114
Tabelle 3.20:	Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls	116
Tabelle 4.1:	Bemessungswert der Widerstandsgröße: Biegezugfestigkeit von Glas unter Stoßeinwirkung	127
Tabelle 4.2:	Bemessungswert der Energie zum rechnerischen Nachweis einer absturzhemmenden Glastafel	130
Tabelle 4.3:	Versuchserfahrung, gebrochene und intakte Glastafeln	136
Tabelle 5.1:	Wirksame Masse von anprallenden Menschen	147
Tabelle 5.2:	Kontaktzeiten des anprallenden Menschen	157
Tabelle 5.3:	Parameter zur Berechnung des Anprallrisikos	162
Tabelle 5.4:	Koeffizienten zur Wichtung des Verletzungsrisikos	162
Tabelle 5.5:	Koeffizienten zur Wichtung der Nutzungshäufigkeit	162
Tabelle 5.6:	Vorschläge zum Nachweis stoßbeanspruchter Bauteile [Ni 80]	164
Tabelle 5.7:	Kräfte beim Umfallen eines Menschen [Um 04]	167
Tabelle 5.8:	Kräfte beim Anprall eines Menschen [Um 04]	167
Tabelle 5.9:	Vergleich der übertragenen Energien: Dummy - Pendel	178
Tabelle 5.10:	Kräfte die beim Anprall auf den Stoßkörper wirken	178
Tabelle 5.11:	Kontaktflächen des Dummys beim untersuchten Anprall	178
Tabelle 5.12:	Sicherheiten absturzsichernder Verglasungen mit statistischen Betrachtungen	180
Tabelle 5.13:	Die beim Anprall des Dummys auf die Glastafel übertragene Energie	181
Tabelle A 1:	Geschichte der ETB-Richtlinie in Baden-Württemberg	204
Tabelle A 2:	Laufgeschwindigkeiten und kinetische Energie des Menschen	206

Tabelle A 3:	Energien infolge des Doppelreifen-Prüfkörpers	207
Tabelle A 4.1:	Einflüsse des Stoßkörpers, Fallhöhe $h = 450$ mm, Zweimassenschwinger	208
Tabelle A 4.2:	Einflüsse des Prüfkörpers, Fallhöhe $h = 450$ mm, Zweimassenschwinger	209
Tabelle A 4.3:	Berechnungsergebnisse mit dem Zweimassenschwingermodell, Fallhöhe $h = 450$ mm.....	210
Tabelle A 4.4:	Generalisierte Masse der VSG-Tafeln der TRAV, Tab. 2, Einwirkung in Tafelmitte	211
Tabelle A 4.5:	Generalisierte Masse der VSG-Tafeln der TRAV, Tab. 2, Einwirkung im Drittelpunkt	211
Tabelle A 5.1:	Ersatzlasttabelle „Kräfte auf den Stoßkörper“ berechnet mit dem Zweimassenschwinger-modell	212
Tabelle A 6.1:	Anteile der Trägheitskräfte am Kräftegleichgewicht der Glastafel (Zweimassenschwingermodell).....	213
Tabelle A 7.1:	Vergleich zwischen Berechnungen und Pendelschlagversuchen	214
Tabelle A 8.1:	Simulation 1 mit dem Zweimassenschwinger	216
Tabelle A 8.2:	Simulation 2 mit dem Zweimassenschwinger	217
Tabelle A 8.3:	Simulation 3 mit dem Zweimassenschwinger	218
Tabelle A 8.4:	Simulation 4 mit dem Zweimassenschwinger	219
Tabelle A 8.5:	Simulation 5 mit dem Zweimassenschwinger	220
Tabelle.A 12.1:	Variationskoeffizienten der Biegezugfestigkeit von Glas.....	228
Tabelle A 15.1:	Ergebnisse Glastafel 8 mm x 1.050 mm x 2.056 mm	242
Tabelle A 15.2:	Bestandene Pendelschlagversuche nach DIN EN 12600 an Glastafeln aus 2 x 4 mm mit ähnlicher Geometrie.....	243
Tabelle A 15.3	Ergebnisse Glastafel 2 x 5 mm x 1.050 mm x 2.056 mm	245
Tabelle A 15.4:	Bestandene Pendelschlagversuche nach DIN EN 12600 an Glastafeln aus 2 x 5 mm mit ähnlicher Geometrie.....	245
Tabelle A 15.5	Ergebnisse Glastafel 10 mm x 1.500 mm x 3.000 mm	247
Tabelle A 15.6:	Bestandene Pendelschlagversuche nach DIN EN 12600 an Glastafeln aus 2 x 5 mm mit ähnlicher Geometrie.....	247
Tabelle A 15.6:	Ergebnisse Glastafel 12 mm x 3.200 mm x 6.000 mm.....	248
Tabelle A 15.7:	Bestandene Pendelschlagversuche nach DIN EN 12600 an Glastafeln aus 12 mm mit ähnlicher Geometrie.....	249
Tabelle A 15.8:	Ergebnisse Glastafel 8 mm x 4.000 mm x 2.000 mm.....	249
Tabelle A 16.9:	Ergebnisse Glastafel 8 mm x 2.000 mm x 1.000 mm.....	250

Tabelle A 16.9: Berechnungsergebnissen des linearen Zweimassenschwingermodells und SJ MEPLA	252
---	-----

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1:	Durch Anprall beanspruchte Glastafel im Versagenszustand Foto: C. Keller ...	2
Bild 1.2:	Problemstellung - Stand der Technik – Ergebnis der vorliegenden Arbeit.....	4
Bild 1.3:	Allgemeines Ersatzmodell zum Anprall eines Stoßkörpers	8
Bild 2.1:	Momentaufnahme beim Anprall des Stoßkörpers, Glassplitter würden auf darunter liegende Verkehrsflächen fallen Foto: Labor für Stahl- und Leichtmetallbau FHM	12
Bild 2.2:	Für Kinder gefährliche absturzsichernde Glasbrüstung aus ESG, ungeschützte Glaskante und eine ungestützte Ecke Foto: U. Brendler.....	19
Bild 2.3:	Verbund-Sicherheits-glastafel nach einem Anprall, Raumabschluss bleibt gewahrt	21
Bild 2.4:	Kategorie A, raumhohe absturzsichernde Glastafel nach TRAV.....	23
Bild 2.5:	Kategorie C – absturzsichernde Glastafel mit vorgesetztem Handlauf nach TRAV	24
Bild 2.6:	Kategorie B – Brüstungsglastafeln nach TRAV	24
Bild 2.7:	Versuchsaufbau des Pendelschlagversuches nach DIN EN 12600	31
Bild 2.8:	Seitenansicht des Versuchsaufbaus	32
Bild 2.9:	Ansicht des Prüfkörpers	32
Bild 2.10:	Unterschiedliche Auftreffstellungen des Stoßkörpers - idealer a) und schräger b) Anprall	37
Bild 3.1:	Auftreffgeschwindigkeit des Stoßkörpers	48
Bild 3.2:	Massenträgheitsmomente des Stoßkörpers	49
Bild 3.3:	Primär- und Sekundärwellen in der Glastafe	52
Bild 3.4:	Bewegungsrichtungen während der Dekompressionsphase.....	53
Bild 3.5:	Anprall eines Menschen	54
Bild 3.6:	Statisches Modell des linearen Zweimassenschwingers	55
Bild 3.7:	Skizze der Eingangswerte für Tabelle.....	58
Bild 3.8:	Skizze der Eingangswerte für Tabelle.....	58
Bild 3.9:	Energieübertragungsmechanismen starrer und elastischer Stoßkörper.....	64

Bild 3.37:	Einfluss der Unterkonstruktion	90
Bild 3.38:	Einfluss der Unterkonstruktion bei MIG	90
Bild 3.39:	Verlauf der Auflagerkräfte entlang des Scheibenrandes	91
Bild 3.40:	Energieanteile beim Stoßvorgang 3mm ESG mit SJ MEPLA	92
Bild 3.41:	Finite Elemente Modell des Stoßkörpers mit Vernetzung	94
Bild 3.42:	Vergleich der Modellierung des Stoßkörpers mit Messdaten aus [Sc 01]	96
Bild 3.43:	Bildserie Stoßkörper 3D, Blickrichtung gegen die Kontaktfläche der Reifen	97
Bild 3.44:	Bildserie Stoßkörper 2D	98
Bild 3.45:	Versuchsaufbau, Glastafel 360 mm x 1 100 mm zweiseitig liniengelagert.....	99
Bild 3.46:	FE-Modell des Programms LS-DYNA	100
Bild 3.47:	Gegenüberstellung: Versuch - LS-DYNA Ergebnisse (Messdaten aus [Bu 04a], h = 100 mm)	102
Bild 3.48:	Gegenüberstellung: Versuch – Simulationen mit diversen Werkstoffannahmen, h = 100 mm.....	102
Bild 3.49:	Vergleich Messung Berechnung 8 x 360 x 1.100, [Bu 04] Fallhöhe h = 180 mm	103
Bild 3.50:	Vergleich validierter Pendelmodelle; SJ MEPLA und LS-DYNA	105
Bild 3.51:	FE-Modell der Glastafel und des Stoßkörpers	106
Bild 3.52:	Pendelschlag auf ESG mit SJ MEPLA und LS-DYNA	107
Bild 3.53:	Benchmark für eine allseitig gelagerte Glastafel 7,75 mm x 1.050 mm x 2.056 mm, Stoßkörperanprall h = 450 mm	108
Bild 3.54:	Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen bei Einscheiben-Sicherheitsglas	108
Bild 3.55:	Einfluss unterschiedlicher Anprallwinkel des Stoßkörpers.....	109
Bild 3.56:	Geometrie der Glastafel sowie Lage des Anschlag- und Messpunktes.....	110
Bild 3.57:	Ausschwingverhalten der Glastafel aus 15 mm ESG, h = 200 mm	110
Bild 3.58:	Auszug der Glastafelverformung (Bild 3.57) beim Pendelschlag gegen ESG, t=15 mm, h = 200 mm	111
Bild 3.59:	Benchmark für eine zweiseitig gelagerte Glastafel 15 mm x 360 mm x 1.100 mm, Stoßkörperanprall h = 200 mm	111
Bild 3.60:	FE-Modell einer MSI Tafel	112
Bild 3.61:	Vergleich MSI LS-DYNA, Messwerte [Rü 02a]	112
Bild 3.62:	Einfluss der Unterkonstruktion	113
Bild 3.63:	Pendelschlag auf MSI mit SJ MEPLA und LS-DYNA	113

Bild 3.64:	Benchmark für allseitig gelagertes Mehrscheiben-Isolierglas 7,75 ESG/ 16 SZR/7,75 ESG, 1.050 mm x 2.056 mm, Stoßkörperanprall h = 450 mm	114
Bild 3.65:	Dynamischer Elastizitätsmodul von Glas bei Stoßeinwirkung (Messdaten aus [Bu 04a])	116
Bild 3.66:	Gemessene Tafelverschiebung abhängig von der Fallhöhe (Messdaten aus [Bu 04a])	117
Bild 3.67:	Gemessene Dehnungen in Abhängigkeit von der Fallhöhe (Messdaten aus [Bu 04a])	117
Bild 3.68:	Vergleich der Dehnungen zwischen Messung und Berechnung, Fallhöhe h = 180 mm	118
Bild 3.69:	Gemessene Zeit – Weg – Verläufe unter Stoßeinwirkung (Messdaten aus [Bu 04a])	119
Bild 3.70:	Weg – Zeit – Verläufe der Prüfkörper aus unterschiedlichen Glasarten (Messdaten aus [Bu 04a]).....	120
Bild 4.1:	Bemessungswert der Prüfenergie für verschiedene Variationskoeffizienten und unterschiedliche Herstellungsqualität	129
Bild 4.2:	Zusammensetzung der Prüfenergie bei SPG und überwachter Herstellung ...	130
Bild 4.3:	Zusammensetzung der Prüfenergie bei SPG und konventioneller Ausführung	130
Bild 4.4:	Ablauf des rechnerischen Nachweises einer absturzhemmenden Verglasung	134
Bild 4.5:	Gewichte von Glastafeln, die beim Pendelschlag nicht gebrochen sind.....	136
Bild 4.6:	Gewichte von Glastafeln, die beim Pendelschlag gebrochen sind.....	137
Bild 4.7:	Anzahl gebrochener und unebrochener Glastafeln	137
Bild 4.8:	Welligkeit deutet auf unter Zwang eingebaute Glastafeln hin.....	140
Bild 4.9:	Pfostenbefestigung mit "undefinierter" Tragfähigkeit, Schrauben fehlen Foto: H. Winkler	140
Bild 5.1:	Federsteifigkeit des Zwillingsreifens	149
Bild 5.2:	Stoßkörperkraft in Abhängigkeit von der Fallhöhe	150
Bild 5.3:	Kraft-Weg-Diagramm unterschiedlicher Stoßkörper.....	150
Bild 5.4:	Vergleich der Federsteifigkeit unterschiedlicher Stoßkörper	151
Bild 5.5:	Steifigkeit Mensch und Stoßkörper.....	152
Bild 5.6:	Aufteilung der Gesamtkörpermasse	153
Bild 5.7:	Knochenmasse / Schwabbelmasse	153
Bild 5.8:	Statisches Ersatzsystem des anprallenden Menschen	155
Bild 5.9:	Prinzipieller Zeit - Weg - Verlauf eines Prüfkörpers beim Menschenanprall	156

Bild 5.10:	Verformungsverläufe der Glastafel nach dem Anprall eines Menschen oder eines Stoßkörpers, [Sc 01] Bild 10.11.....	159
Bild 5.11:	Vergleich der Dehnungen in der Glastafel nach [Wö 00a] Abb. 2.12.....	160
Bild 5.12:	Maximale Glasdehnung infolge Anprall von Stoßkörper und Menschen, [Sc 01] Bild 10.13	161
Bild 5.13:	Stoßbeanspruchung durch Menschen nach [Ni 76], Abschnitt 5.3.....	163
Bild 5.14:	Minimalwerte des dynamischen Überhöhungsfaktors (nach [Ni 76]).....	164
Bild 5.15:	Mittelwerte des dynamischen Überhöhungsfaktors (nach [Ni 76]).....	165
Bild 5.16:	Maximalwerte des dynamischen Überhöhungsfaktors(nach [Ni 76])	165
Bild 5.17:	Kraft- Zeitverlauf beim Schulterstoß [Sc 93] Abs. 4.2	166
Bild 5.18:	Geglätteter Zeit-Beschleunigungs-Verlauf des Skateboardfahrers, (Messdaten aus [Bu 04a]).....	168
Bild 5.19:	Skateboardfahrer und Stoßkörper nach DIN EN 12600 im Vergleich zum Berechnungsergebnis mit LS-DYNA (Messdaten aus [Bu 04a])	169
Bild 5.20:	Vergleich Pendelschlagversuch – Schulteranprall (Messdaten aus [Bu 04a])	170
Bild 5.21:	Vergleich Pendelschlagversuch Fallhöhe 450 mm – Schulteranprall eines Menschen mit 82 kg Masse (Messdaten aus [Sc 05]).....	171
Bild 5.22:	DYNAMORE ES-2 Dummy (aus [DY 04])	172
Bild 5.23:	Schulter im ES-2 Dummy (aus [DY 04]).....	172
Bild 5.24:	Beschleunigungsmesssensoren im ES-2 Dummy (aus [DY 04]).....	173
Bild 5.25:	Glastafel 8 x 1.050 x 2.056 mit Dummy	174
Bild 5.26:	Anprall des ES-2 Dummy gegen 8 mm ESG 1.050 mm x 2.056 mm, Simulation	175
Bild 5.27:	Energieverteilung beim Anprall des ES-2 Dummy mit einer Anprallgeschwindigkeit von 5 m/s	175
Bild 5.28:	Vergleich der Energieübertragung zwischen Dummy und Stoßkörper nach DIN EN 12600	177
Bild 5.29:	Vergleich der Kraftverläufe zwischen Dummy und Stoßkörper nach DIN EN 12600.....	178
Bild 5.30:	Vergleich der einwirkenden Kraft pro Fläche bei unterschiedlichen Stoßkörpern.....	179
Bild 5.31:	Energieverteilung beim Anprall eines Dummy mit einer Geschwindigkeit von 8,3 m/s (z.B. eines Skateboardfahrers)	182
Bild 5.32:	Geschwindigkeit – Energie – Diagramm des ES-2 Dummys, berechnet mit LS-DYNA	182

Anhang

Anhang A 1: Die ETB-Richtlinie in Baden-Württemberg

Tabelle A 1: Geschichte der ETB-Richtlinie in Baden-Württemberg

Datum	Bemerkung	Fundstelle	In BW baurechtlich eingeführt	Erfordernis einer Zustimmung im Einzelfall für Verglasungen
1983	Beanspruchung von Bauteilen, denen Sicherungsfunktionen gegen Absturz zugewiesen werden	DIBT Mitteilungen 3/82 S. 83		
06-1985	ETB - Richtlinie "Bauteile, die gegen Absturz sichern" erscheint	DIBT Mitteilungen 2/87 S. 49	Nein	Ja
04-1986	Muster für den Einführungslerass „Bei Verwendung von Glas ist eine zusätzliche Sicherung gegen Absturz vorzusehen“	DIBT Mitteilungen 2/87 S. 49	Nein	Ja
	„.... Jedenfalls kann ich mich noch vage erinnern, dass vor der ETB-Richtlinie ein quasi gesetzloser Zustand herrschte. O.K. da gab es einen Erlass in Hessen, der absturzsichernde Maßnahmen forderte. Der wurde auch gerne herangezogen, obwohl in B.-W. nicht eingeführt.... Also wurde beiläufig in Kauf genommen, dass die unteren Baurechtsbehörden bei entsprechenden Fällen meistens wegsahen; d.h. die Problematik einer notwendigen Zustimmung erledigte sich durch Negation der Realität. ...“	Zitat des ehemaligen Leiters der Landesstelle für Bautechnik Baden-Württemberg, von Herrn H.-R. Lukas	Nein	Ja
31.03.93	Letzte Baunormenbekanntmachung ETB ist nicht genannt	GABl S. 527	Nein	Ja

04.02.97	Erste Liste der technischen Baubestimmungen Die ETB-Richtlinie ist ohne Anlage eingeführt	GABI S. 207	Ja, auch für Glas	Nein
Ab 13.12.00	LTB mit Anlage 1.1/5: „Die Richtlinie gilt nicht für Bauteile aus Glas“	GABI 2000 S. 371	Ja, nicht für Glas	Ja
Informativ für Verglasungen:				
03-2001	Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen - Entwurfsfassung März 2001	Mitteilungen DIBt 3/2001, S. 86 bis 93	Nein	Ja
Ab 01- 2003	Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen - Fassung Januar 2003	Mitteilungen DIBt 2/2003, S. 58 bis 59	Nein, geduldet	Ja

Anhang A 2: Laufgeschwindigkeiten des Menschen

Tabelle A 2: Laufgeschwindigkeiten und kinetische Energie des Menschen

Laufbedingungen	Quelle	km/h	m/s	Kinetische Energie Mensch 80 kg 100% [Nm]	Kinetische Energie Mensch 80 kg 60% [Nm]	Tatsächlich auf die Glas- tafel übertragene Energie (nach Abschnitt 5.4.4) [Nm]
100 m - Sprint eines Spitzensportlers	[He 91]	43,2	12,0	5.760	3.456	
Schnelles Laufen eines Nichtsportlers	[DIN 52337]	18,0	5,0	1.000	600	
Mittlere Laufgeschwindigkeit	[DIN 52337]	14,0	3,9	608	365	
„... In Zimmern oder auf Balkonen maximal erreichbare Geschwindigkeit ...“	[DIN 52337]	9,0	2,5	250	150	
Versuche mit einer Anlaufstrecke von 1 m	[Rü 99a], Tab.1	8,6	2,4	230	138	
Versuche mit einer Anlaufstrecke von 4 m	[Rü 99a], Tab.1	18,7	5,2	1 082	649	
Rückgerechnet von Basisenergie der [ETB 87]		7,3	2,04	166	100	
„... Anprall eines menschlichen Körpers durch Gleichgewichtsverlust bei der Fortbewegung oder aus erhöhtem Stand ...“			2,0 – 4,0	166 - 640	100 - 384	
Schnelles Laufen eines Nichtsportlers (75 kg)	Annahme	18,0	5,0	938	563	
Simulation ES-2-DUMMY (75 kg)	Annahme	18,0	5,0	-	-	139
Inliner z. B. Fußgängerzone (75 kg)	Annahme	30,0	8,4	2.646	1.588	
Simulation ES-2-DUMMY (75 kg)	Annahme	30,0	8,4	-	-	538

Anhang A 3: Energien infolge des Doppelreifen-Prüfkörpers

Tabelle A 3: Energien infolge des Doppelreifen-Prüfkörpers

	Grundlage für Zustimmungen im Einzelfall 1997-2001		E-TRAV/TRAV seit 2001	
	Masse / Fallhöhe	Kinetische Energie ²⁸ [Nm]	Masse / Fallhöhe	Kinetische Energie ²⁸ [Nm]
Kategorie C, Bild 2.5	45 kg / 700 mm	309	50 kg / 450 mm	221
Kategorie B, Bild 2.6	45 kg / 700 mm ²⁹ Anlaufweg unter 5,0 m	309	50 kg / 700 mm keine Unterscheidung des Anlaufweges	343
	45 kg / 1.200 mm ²⁹ Anlaufweg über 5,0 m	530		
Kategorie A, Bild 2.4	45 kg / 700 mm ²⁹	309	50 kg / 900 mm keine Unterscheidung des Anlaufweges	441
	Anlaufweg unter 5,0 m			
	45 kg / 1.200 mm ²⁹ Anlaufweg über 5,0 m	530		

2) Energie unmittelbar vor dem Anprall an das Glas.

²⁸ Energie unmittelbar vor dem Anprall an das Glas.

²⁹ Von Prof. Dipl.-Ing. H. Charlier wurde mit [Ch 96] und [Ch 97] eine Unterscheidung des Anlaufweges vorgeschlagen. Es sollten zwei Bereiche nach Personenaufkommen unterschieden werden. Wenn die Wahrscheinlichkeit hinreichend gering ist, dass Personen mit hoher Geschwindigkeit gegen die Umwehrung laufen oder stürzen können, als Kriterium wurde freie Wegstrecke senkrecht zur Verglasungsebene kleiner als 5m gewählt, konnten die Fallhöhen des Pendelschlages reduziert werden. Gleiches galt, bei Verglasungen, die in Wohnungen, Hotel-, Büro- und Krankenzimmern oder in ähnlich genutzten Räumen, einschließlich der zugehörigen Flure, Balkone und Treppen eingebaut werden. In diesen Anwendungsfällen sind extreme Anprallszenarien unwahrscheinlich.

Anhang A 4: Berechnungsergebnisse des linearen Zweimassenschwingermodells

Tabelle A 4.1: Einflüsse des Stoßkörpers, Fallhöhe $h = 450$ mm, Zweimassenschwinger

	Stoßkörpers $m_{sk} = 50$ kg			Prüfkörper
	Steifigkeit c_{sk} [N/m]			$c_{pk} = 395.761$ [N/m]
	197881	395.761	791522	Generalisierte Masse m_{gpk} [kg]
Stoßkörperkraft [kN]	-3,83	-5,41	-7,87	10
Trägheitskraft Glastafel [kN]	3,35	5,24	7,30	
Kräfte auf die Glastafel [kN]	4,02	3,70	3,11	
Stoßdauer [s]	0,039	0,028	0,020	
Verformung Glastafel [mm]	10,15	9,35	7,87	
max. E_{elast}/E_{start} [%]	46,15	39,19	27,74	
max. E_{kin}/E_{start} [%]	83,21	48,55	61,59	
max. E_{sum}/E_{start} [%]	83,28	59,21	61,84	
Stoßkörperkraft [kN]	-6,87	-9,52	-14,30	50
Trägheitskraft Glastafel [kN]	8,47	13,03	11,76	
Kräfte auf die Glastafel [kN]	11,77	13,04	12,64	
Stoßdauer [s]	0,054	0,044	0,033	
Verformung Glastafel [mm]	29,74	32,94	31,94	
max. E_{elast}/E_{start} [%]	79,30	97,27	91,45	
max. E_{kin}/E_{start} [%]	33,35	62,48	59,73	
max. E_{sum}/E_{start} [%]	79,30	97,37	99,55	
Stoßkörperkraft [kN]	-9,36	-12,90	-20,18	100
Trägheitskraft Glastafel [kN]	7,62	12,67	18,12	
Kräfte auf die Glastafel [kN]	15,23	17,88	18,14	
Stoßdauer [s]	0,056	0,047	0,037	
Verformung Glastafel [mm]	38,47	45,17	45,84	
max. E_{elast}/E_{start} [%]	66,34	91,45	94,21	
max. E_{kin}/E_{start} [%]	15,22	29,86	47,33	
max. E_{sum}/E_{start} [%]	66,34	91,45	94,44	

Tabelle A 4.2: Einflüsse des Prüfkörpers, Fallhöhe $h = 450 \text{ mm}$, Zweimassenschwinger

Stoßkörpers $m_{sk} = 50 \text{ kg}$ $c_{sk} = 395.761 \text{ N/m}$	Prüfkörper			
	Steifigkeit $c_{pk} [\text{kN/m}]$			generalisierte Masse m_{gpk} [kg]
	50	500	5.000	
Stoßkörperkraft [kN]	-7,23	-10,33	-12,76	5
Trägheitskraft Glastafel [kN]	4,07	3,25	1,23	
Kräfte auf die Glastafel [kN]	4,69	11,49	13,73	
Stoßdauer [s]	0,020	0,015	0,006	
Verformung Glastafel [mm]	83,59	22,99	2,75	
max. $E_{elast}/E_{start} [\%]$	79,14	59,84	8,55	
max. $E_{kin}/E_{start} [\%]$	26,39	7,65	0,22	
max. $E_{sum}/E_{start} [\%]$	87,73	59,84	8,55	
Stoßkörperkraft [kN]	-10,59	-9,57	-12,60	50
Trägheitskraft Glastafel [kN]	9,05	12,95	4,76	
Kräfte auf die Glastafel [kN]	3,80	14,38	16,47	
Stoßdauer [s]	0,049	0,042	0,019	
Verformung Glastafel [mm]	62,96	28,76	3,29	
max. $E_{elast}/E_{start} [\%]$	44,90	93,69	12,29	
max. $E_{kin}/E_{start} [\%]$	86,25	59,93	2,43	
max. $E_{sum}/E_{start} [\%]$	99,98	93,70	12,29	
Stoßkörperkraft [kN]	-12,71	-12,67	-12,69	500
Trägheitskraft Glastafel [kN]	12,52	11,87	20,37	
Kräfte auf die Glastafel [kN]	1,55	6,54	20,85	
Stoßdauer [s]	0,067	0,067	0,057	
Verformung Glastafel [mm]	16,04	13,06	4,17	
max. $E_{elast}/E_{start} [\%]$	2,91	19,32	19,70	
max. $E_{kin}/E_{start} [\%]$	32,01	24,74	35,20	
max. $E_{sum}/E_{start} [\%]$	32,91	31,61	37,38	

Tabelle A 4.3: Berechnungsergebnisse mit dem Zweimassenschwingermodell, Fallhöhe $h = 450 \text{ mm}$

$m_{sk} = 50 \text{ kg}$	Stoßkörper			Prüfkörper
	Steifigkeit c_{sk}			Steifigkeit $c_{pk} = 395.761$ [N/m]
	[N/m]			generalisierte Masse m_{gpk} [kg]
	197.881	395.761	791.522	
Stoßkörperkraft [kN]	-7,60	-10,02	-12,44	5
Trägheitskraft Glastafel [kN]	1,99	3,45	5,50	
Kräfte auf die Glastafel [kN]	8,89	10,85	12,31	
Stoßdauer [s]	0,018	0,016	0,013	
Verformung Glastafel [mm]	22,47	27,41	31,11	
max. E_{elast}/E_{start} [%]	45,25	67,35	86,74	
max. E_{kin}/E_{start} [%]	4,08	9,71	15,34	
max. E_{sum}/E_{start} [%]	45,25	67,35	86,74	
Stoßkörperkraft [kN]	-6,87	-9,52	-14,30	50
Trägheitskraft Glastafel [kN]	8,47	13,03	11,76	
Kräfte auf die Glastafel [kN]	11,77	13,04	12,64	
Stoßdauer [s]	0,054	0,044	0,033	
Verformung Glastafel [mm]	29,74	32,94	31,94	
max. E_{elast}/E_{start} [%]	79,30	97,27	91,45	
max. E_{kin}/E_{start} [%]	33,35	62,48	59,73	
max. E_{sum}/E_{start} [%]	79,30	97,37	99,55	
Stoßkörperkraft [kN]	-8,92	-12,76	-18,10	500
Trägheitskraft Glastafel [kN]	8,13	12,01	17,38	
Kräfte auf die Glastafel [kN]	6,40	5,46	4,34	
Stoßdauer [s]	0,094	0,067	0,048	
Verformung Glastafel [mm]	12,40	13,72	10,98	
max. E_{elast}/E_{start} [%]	13,79	16,87	10,80	
max. E_{kin}/E_{start} [%]	21,44	26,15	29,24	
max. E_{sum}/E_{start} [%]	30,78	31,91	32,48	

Tabelle A 4.4: Generalisierte Masse der VSG-Tafeln der TRAV, Tab. 2, Einwirkung in Tafelmitte

	b [mm]	h _G [mm]	t [mm]	A _{Skx} [mm]	A _{Sky} [mm]	m _{mpk} [kg]	c _{pk} [N/m]
Anschlagpunkt 1/2	400	1.000	12	200	500	1,8	4.705
	400	3.000	12	200	1.500	9,2	4.553
	500	1.000	12	250	500	3,2	3.099
	500	2.000	12	250	1.000	7,4	2.917
	2.000	1.000	12	1.000	500	10,8	775
	2.000	1.200	12	1.000	600	12,5	569
	500	1.000	16	250	500	4,3	7.345
	500	2.500	16	250	1.250	12,6	6.908
	1.500	2.500	16	750	1.250	30,9	863
	2.500	1.500	16	1.250	750	26,0	863
	1.000	1.200	20	500	600	11,4	4.564
	1.000	2.100	20	500	1.050	22,9	3.548
	2.100	1.000	20	1.050	500	19,3	3.548
	2.100	3.000	20	1.050	1.500	62,3	924
	3.000	1.200	20	1.500	600	37,1	2.397
	3.000	2.100	20	1.500	1.050	54,5	924
					min	1,8	569
					max	62,3	7.345

Tabelle A 4.5: Generalisierte Masse der VSG-Tafeln der TRAV, Tab. 2, Einwirkung im Drittelspunkt

	b [mm]	h _G [mm]	t [mm]	A _{Skx} [mm]	A _{Sky} [mm]	m _{mpk} [kg]	c _{pk} [N/m]
Anschlagpunkt 1/3	400	1.000	12	133	333	0,7	18.300
	400	3.000	12	133	1.000	5,2	22.300
	500	1.000	12	167	333	0,8	23.141
	500	2.000	12	167	667	3,0	16.389
	2.000	1.000	12	667	333	1,1	5.785
	2.000	1.200	12	667	400	1,5	4.559
	500	1.000	16	167	333	19,0	41.770
	500	2.500	16	167	833	5,7	36.331
	1.500	2.500	16	500	833	7,2	6.916
	2.500	1.500	16	833	500	3,1	6.916
	1.000	1.200	20	333	400	2,2	39.763
	1.000	2.100	20	333	700	6,2	25.960
	2.100	1.000	20	700	333	1,9	25.960
	2.100	3.000	20	700	1.000	13,3	7.765
	3.000	1.200	20	1.000	400	2,9	16.266
	3.000	2.100	20	1.000	700	7,4	7.765
					min	0,7	4.559
					max	19,0	41.770

Anhang A 5: Parameterstudien zum Pendelschlagversuch mit dem linearen Zweimassenschwingermodell berechnete Kräfte

Berechnungsergebnisse mit dem linearen Zweimassenschwingermodell – Kräfte auf den Stoßkörper beim Pendelschlagversuch

Wirksame Masse m_{HSH} [kg]	Steifigkeit der Glasstafel c_{St} [N/m]	10	100	1.000	5.000	10.000	50.000	100.000	395.761	500.000	1.000.000	5.000.000	10.000.000	100.000.000
0,5	1,38	1,52	2,05	2,48	2,73	3,30	5,47	6,82	9,76	10,22	11,34	12,73	12,97	13,19
1	1,91	2,05	2,48	2,88	3,25	3,79	5,85	7,14	9,86	10,28	11,37	12,71	12,98	13,19
1,5	2,32	2,45	2,88	3,63	3,63	4,16	6,13	7,31	9,91	10,33	11,49	12,74	12,97	13,19
2	2,65	2,79	3,20	3,92	3,92	4,46	6,41	7,60	10,03	10,41	11,22	12,69	12,97	13,19
2,5	2,94	3,07	3,48	4,21	4,21	4,72	6,55	7,65	10,23	10,61	11,47	12,78	12,95	13,19
5	4,04	4,16	4,55	5,20	5,20	5,66	7,33	8,34	10,02	10,33	10,96	12,76	12,99	13,19
7,5	4,83	4,94	5,29	5,88	5,88	6,31	7,88	8,33	10,68	10,98	11,61	12,75	12,99	13,19
10	5,39	5,55	5,87	6,44	6,44	6,83	8,35	8,85	10,84	11,11	11,86	12,81	12,95	13,19
15	5,95	6,05	6,35	6,89	6,89	7,26	8,46	9,25	10,74	10,96	11,83	12,67	12,93	13,19
17,5	6,39	6,49	6,76	7,27	7,27	7,60	8,62	9,54	10,49	10,66	11,61	12,54	13,00	13,19
20	6,77	6,86	7,14	7,59	7,59	7,91	8,82	9,75	10,18	10,27	11,28	12,60	13,01	13,19
22,5	7,10	7,19	7,45	7,89	7,89	8,19	9,08	9,92	9,83	9,84	10,89	12,70	12,99	13,19
25	7,40	7,48	7,73	8,14	8,14	8,44	9,30	10,05	9,47	9,39	10,44	12,78	12,94	13,19
27,5	7,67	7,59	7,98	8,37	8,37	8,65	9,49	10,17	8,94	8,94	9,97	12,84	12,90	13,19
30	7,90	7,97	8,21	8,58	8,58	8,84	9,65	10,27	8,80	8,80	9,48	12,87	12,87	13,19
32,5	8,13	8,20	8,40	8,76	8,76	9,02	9,80	10,36	8,49	8,42	8,99	12,88	12,87	13,19
35	8,32	8,39	8,58	8,94	8,94	9,18	9,94	10,45	8,53	8,53	9,02	12,87	12,89	13,19
37,5	8,51	8,57	8,76	9,09	9,09	9,32	10,05	10,52	8,71	8,77	9,16	12,85	12,92	13,19
40	8,67	8,74	8,93	9,23	9,23	9,46	10,16	10,60	8,87	8,93	9,29	12,83	12,95	13,19
42,5	8,89	8,99	9,03	9,37	9,37	9,58	10,26	10,66	9,08	9,08	9,41	12,79	12,97	13,19
45	9,12	9,17	9,31	9,62	9,62	9,81	10,44	10,79	9,29	9,34	9,63	12,75	12,99	13,19
47,5	9,24	9,30	9,46	9,71	9,71	9,91	10,52	10,85	9,41	9,46	9,73	13,02	13,02	13,19
50	9,36	9,42	9,57	9,81	9,81	10,00	10,59	10,91	9,52	9,57	9,83	12,65	13,03	13,19
100	10,80	10,68	10,90	11,05	11,05	11,15	11,47	11,68	10,88	10,90	11,02	12,60	12,60	13,19
170	11,12	11,14	11,20	11,32	11,32	11,40	11,66	11,86	11,17	11,19	11,28	12,53	12,64	13,19
140	11,35	11,37	11,42	11,52	11,52	11,59	11,81	12,00	11,40	11,42	11,49	12,48	12,67	13,19
160	11,54	11,56	11,61	11,70	11,70	11,75	11,93	12,11	11,58	11,60	11,66	12,43	12,63	13,20
180	11,70	11,70	11,76	11,81	11,81	11,87	12,04	12,20	11,73	11,74	11,79	12,36	12,61	13,19
200	11,83	11,84	11,88	11,93	11,93	11,99	12,12	12,27	11,86	11,86	11,91	12,24	12,60	13,19
220	11,93	11,95	11,98	12,03	12,03	12,08	12,21	12,33	11,96	11,97	12,00	12,29	12,60	13,19
250	12,06	12,08	12,08	12,16	12,16	12,19	12,31	12,41	12,09	12,10	12,13	12,36	12,61	13,18
300	12,24	12,25	12,26	12,31	12,31	12,34	12,44	12,51	12,25	12,26	12,28	12,45	12,64	13,18
350	12,37	12,37	12,39	12,42	12,42	12,44	12,54	12,58	12,43	12,43	12,40	12,53	12,68	13,19
400	12,46	12,46	12,46	12,49	12,49	12,51	12,61	12,64	12,58	12,58	12,49	12,59	12,71	13,19
450	12,54	12,55	12,56	12,58	12,58	12,60	12,66	12,69	12,69	12,69	12,56	12,65	12,74	13,20
500	12,61	12,61	12,62	12,64	12,64	12,65	12,71	12,73	12,76	12,76	12,62	12,72	12,77	13,20
550	12,66	12,66	12,67	12,69	12,69	12,69	12,75	12,77	12,77	12,75	12,67	12,73	12,80	13,20
600	12,70	12,70	12,71	12,71	12,71	12,74	12,78	12,81	12,86	12,81	12,71	12,76	12,82	13,20
650	12,74	12,74	12,75	12,76	12,76	12,77	12,81	12,84	12,89	12,86	12,79	12,84	12,84	13,20
700	12,77	12,77	12,78	12,79	12,79	12,80	12,83	12,86	12,91	12,89	12,78	12,82	12,86	13,19
750	12,80	12,80	12,81	12,82	12,82	12,83	12,86	12,89	12,94	12,92	12,81	12,84	12,88	13,19
800	12,82	12,83	12,83	12,84	12,84	12,85	12,87	12,90	12,95	12,94	12,83	12,86	12,90	13,19
850	12,85	12,84	12,85	12,86	12,86	12,87	12,89	12,92	12,97	12,96	12,85	12,88	12,91	13,18
900	12,87	12,87	12,87	12,88	12,88	12,89	12,91	12,93	12,98	12,98	12,87	12,90	12,93	13,18
950	12,88	12,88	12,89	12,89	12,89	12,90	12,92	12,95	12,99	12,99	12,89	12,92	12,94	13,18
1.000	12,90	12,90	12,90	12,91	12,91	12,91	12,94	12,95	13,00	13,00	12,90	12,92	12,95	13,17
5.000	13,15	13,15	13,15	13,15	13,15	13,15	13,16	13,16	13,16	13,16	13,17	13,15	13,15	13,17

Tabelle A 5.1: Ersatzlasttabelle „Kräfte auf den Stoßkörper“ berechnet mit dem Zweimassenschwingermodell

Abhängig von der generalisierten Masse und der Steifigkeit der Konstruktion; Ersatzsteifigkeit des Reifens 39.5761 [N/m]; Fallhöhe 450 mm. Es können entweder die (Federkräfte) oder die Trägheitskräfte (bei starren Konstruktionen) maßgebend werden.

Anhang A 6: Maximaler Anteil der Trägheitskräfte - mit dem linearen Zweimassenschwingermodell berechnete Kräfte

Berechnungsergebnisse mit dem linearen Zweimassenschwingermodell - Anteil der Trägheitskräfte am Gleichgewicht in der Glastafel beim Pendelschlagversuch														
Wirksame Masse		Steifigkeit der Glastafel												
m_{eff} [kg]	c_k [N/m]	10	100	1.000	5.000	10.000	50.000	100.000	395.761	500.000	1.000.000	5.000.000	10.000.000	100.000.000
0,5	4,00	0,86	0,66	0,47	0,38	0,21	0,16	0,09	0,08	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01
1	0,97	0,90	0,74	0,55	0,46	0,28	0,21	0,12	0,10	0,08	0,04	0,03	0,01	0,01
1,5	0,97	0,92	0,77	0,60	0,51	0,32	0,24	0,14	0,12	0,09	0,04	0,03	0,01	0,01
2	0,98	0,93	0,80	0,63	0,55	0,35	0,27	0,15	0,14	0,10	0,05	0,04	0,01	0,01
2,5	0,98	0,93	0,81	0,66	0,58	0,37	0,29	0,17	0,16	0,11	0,06	0,04	0,01	0,01
5	0,98	0,95	0,86	0,73	0,66	0,45	0,36	0,22	0,20	0,14	0,08	0,06	0,02	0,02
7,5	0,99	0,96	0,88	0,77	0,70	0,50	0,40	0,25	0,23	0,17	0,09	0,07	0,02	0,02
10	0,99	0,97	0,90	0,79	0,73	0,53	0,43	0,29	0,26	0,20	0,10	0,08	0,03	0,03
12,5	0,99	0,97	0,91	0,81	0,75	0,55	0,46	0,29	0,26	0,22	0,11	0,08	0,03	0,03
15	0,99	0,97	0,91	0,82	0,76	0,57	0,48	0,29	0,27	0,21	0,12	0,09	0,03	0,03
17,5	0,99	0,97	0,92	0,83	0,78	0,59	0,51	0,30	0,27	0,22	0,13	0,10	0,03	0,03
20	0,99	0,98	0,92	0,84	0,79	0,61	0,53	0,31	0,28	0,22	0,13	0,10	0,04	0,04
22,5	0,99	0,98	0,93	0,85	0,80	0,62	0,55	0,31	0,28	0,22	0,14	0,10	0,04	0,04
25	0,99	0,98	0,93	0,86	0,81	0,63	0,56	0,32	0,29	0,23	0,15	0,11	0,04	0,04
27,5	0,99	0,98	0,94	0,86	0,81	0,64	0,57	0,32	0,30	0,23	0,16	0,11	0,04	0,04
30	0,99	0,98	0,94	0,87	0,82	0,65	0,58	0,33	0,30	0,24	0,16	0,12	0,04	0,04
32,5	0,99	0,98	0,94	0,87	0,83	0,66	0,59	0,34	0,32	0,24	0,17	0,12	0,05	0,05
35	0,99	0,98	0,94	0,88	0,83	0,66	0,59	0,35	0,33	0,26	0,17	0,12	0,05	0,05
37,5	0,99	0,98	0,94	0,88	0,84	0,67	0,58	0,36	0,34	0,27	0,18	0,13	0,05	0,05
40	0,99	0,98	0,95	0,88	0,84	0,68	0,59	0,37	0,35	0,28	0,17	0,13	0,05	0,05
42,5	0,99	0,98	0,95	0,89	0,85	0,69	0,60	0,38	0,36	0,29	0,17	0,13	0,05	0,05
45	0,99	0,98	0,95	0,89	0,85	0,69	0,60	0,39	0,38	0,30	0,17	0,14	0,05	0,05
47,5	0,99	0,98	0,95	0,89	0,85	0,70	0,61	0,40	0,39	0,31	0,17	0,14	0,05	0,05
50	0,99	0,98	0,95	0,89	0,86	0,70	0,61	0,41	0,39	0,31	0,17	0,15	0,06	0,06
100	1,00	0,99	0,96	0,92	0,89	0,77	0,70	0,50	0,40	0,31	0,21	0,17	0,07	0,07
120	1,00	0,99	0,97	0,93	0,90	0,79	0,73	0,53	0,42	0,33	0,24	0,17	0,08	0,08
140	1,00	0,99	0,97	0,93	0,91	0,80	0,75	0,55	0,44	0,34	0,23	0,18	0,09	0,09
160	1,00	0,99	0,97	0,94	0,91	0,81	0,76	0,57	0,47	0,36	0,21	0,18	0,09	0,09
180	1,00	0,99	0,97	0,94	0,92	0,82	0,77	0,58	0,51	0,37	0,22	0,20	0,10	0,10
200	1,00	0,99	0,98	0,94	0,92	0,83	0,78	0,58	0,54	0,38	0,22	0,22	0,10	0,10
220	1,00	0,99	0,98	0,95	0,93	0,83	0,79	0,59	0,57	0,39	0,23	0,23	0,10	0,10
250	1,00	0,99	0,98	0,95	0,93	0,84	0,79	0,60	0,59	0,41	0,24	0,23	0,11	0,11
300	1,00	0,99	0,98	0,95	0,94	0,86	0,81	0,61	0,60	0,44	0,25	0,20	0,12	0,12
350	1,00	0,99	0,98	0,96	0,94	0,87	0,82	0,63	0,61	0,46	0,26	0,21	0,12	0,12
400	1,00	0,99	0,98	0,96	0,94	0,88	0,83	0,65	0,62	0,48	0,27	0,22	0,13	0,13
450	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,89	0,84	0,67	0,63	0,50	0,28	0,23	0,14	0,14
500	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,89	0,84	0,69	0,64	0,52	0,29	0,23	0,15	0,15
550	1,00	1,00	0,98	0,97	0,95	0,89	0,85	0,70	0,66	0,57	0,30	0,24	0,16	0,16
600	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,90	0,86	0,72	0,68	0,60	0,31	0,24	0,16	0,16
650	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,90	0,86	0,73	0,69	0,62	0,31	0,25	0,16	0,16
700	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,91	0,87	0,74	0,70	0,63	0,32	0,26	0,16	0,16
750	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,91	0,87	0,75	0,71	0,63	0,33	0,26	0,16	0,16
800	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,91	0,88	0,76	0,72	0,63	0,34	0,27	0,16	0,16
850	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,91	0,88	0,77	0,73	0,63	0,35	0,27	0,16	0,16
900	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,92	0,89	0,79	0,74	0,63	0,35	0,28	0,16	0,16
950	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,92	0,89	0,80	0,75	0,64	0,36	0,28	0,16	0,16
1.000	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,92	0,89	0,80	0,76	0,64	0,37	0,29	0,17	0,17
5.000	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,96	0,95	0,90	0,89	0,84	0,65	0,50	0,23	0,23

Tabelle A 6.1: Anteile der Trägheitskräfte am Kräftegleichgewicht der Glastafel (Zweimassenschwingermodell)

Anhang A 7: Vergleich von FE – Simulationsergebnissen mit dem Ausgang von Pendelschlagversuchen nach den TRAV

Tabelle A6 dokumentiert den Vergleich der Ergebnisse zwischen rechnerischen Simulationen mit dem Ausgang von Pendelschlagversuchen. Die Berechnungen basieren auf den Annahmen des statischen Elastizitätsmoduls und vollem Verbund bei VSG. Alle dokumentierten Versuche haben die Anforderungen der TRAV hinsichtlich der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung erfüllt. Die berechneten Glastafelbeanspruchungen liegen über den charakteristischen Biegezugspannungen des Werkstoffs Glas. Damit hätte die FE – Simulation eine sichere Aussage bezüglich der Tragfähigkeit der Glastafel abgegeben.

Tabelle A 7.1: Vergleich zwischen Berechnungen und Pendelschlagversuchen

Bauvorhaben in	Bemerkung	Simulation des Pendelschlagversuches			Datum
		Datum	Max. Zugspannung	$\sigma_{R,d,GlaStoß}$	
Pforzheim	VSG 2 x 8 TVG 1,52 PVB, Zweiseitig liniengelagert Spannweite 1.818 mm x 1.264 m	04.09.2002	92,67 N/mm ² (SJ MEPLA)	120,0 N/mm ²	15.11.2000
Tuttlingen ³⁰	VSG 2 x 8 TVG 1,52 PVB 1 x Linie, 3 x Randklemmung, 950 mm x 3.000 mm	21.10.2003	110,04 N/mm ² (SJ MEPLA)	120,0 N/mm ²	30.10.2003
Ulm	2.474 mm x 3.604 m m, MSI 10 SPG 16 SZR 2 x 6 SPG 0,76 PVB, allseitig	15.03.2004	98,81 N/mm ² (SJ MEPLA)	80,0 N/mm ²	13.05.2002
Buggingen	2.180 mm x 2.175 m m, 2 x 6 SPG 1,52 PVB, allseitig	15.03.2004	105,37 N/mm ² (SJ MEPLA)	80,0 N/mm ²	06.05.2001
Mannheim	1.678 mm x 2.756 m m, 2 x 6 SPG 0,76 PVB 8 ESG, dreiseitig Stoß bei	16.03.2004	127,60 N/mm ² (SJ MEPLA)	80,0 N/mm ²	09.10.2003

³⁰ Verfahren, bei dem der Aufsteller der rechnerischen Simulation nachweislich keine Kenntnis über den Ausgang der Versuche hatte.

	600 mm x 1.365 mm				
Walldorf	1.160 mm x 905 mm, 2 x 3 SPG 0,38 PVB	17.03.2004	149,76 N/mm ² (SJ MEPLA)	80,0 N/mm ²	18.02.2000
Stuttgart	1.200 mm x 3.840 m m, 2 x 5 SPG 0,76 PVB	17.03.2004	149,60 N/mm ² (SJ MEPLA)	80,0 N/mm ²	22.05.2003
Stuttgart	2.000 mm x 2.000 mm , 2 x 4 SPG 1,0 GH / 16 SZR / 2 x 6 SPG 0,76 PVB	17.06.2004	171,13 N/mm ² (SJ MEPLA)	80,0 N/mm ²	24.09.2003
Stuttgart	648 mm x 2.245 mm, 12 SPG / 1,52 PVB / 12 SPG/ 0,76 PVB / 5 SPG zweiseitig	16.08.2004	93,17 N/mm ² (SJ MEPLA)	80,0 N/mm ²	13.04.2004
Zuffenhau- sen	900 mm x 3.350 mm, 12 SPG / 0,76 PVB / 12 SPG/ 16 SZR / 15 SPG / 0,76 PVB / 15 SPG, zweiseitig	16.08.2004	84,60 N/mm ² (SJ MEPLA)	80,0 N/mm ²	28.08.2002

Anhang A 8: Ergebnisse des linearen Zweimassenschwingermodells

Stoßkörper und Prüfkörper mit gleicher Masse und Steifigkeit

Tabelle A 8.1: Simulation 1 mit dem Zweimassenschwinger

Prüfkörper (Glastafel)	
generalisierte Masse der Glastafel [kg]	50
Ersatzsteifigkeit der Glastafel [N/m]	395 761
Stoßkörper (DIN EN 12600)	
Masse des Stoßkörpers [kg]	50
Ersatzsteifigkeit des Stoßkörpers [N/m]	395 761
Fallhöhe [m]	0,45

Auslenkungs-Zeit-Verläufe	
<p>x bzw. y [m]</p> <p>t [s]</p>	

Bild A 8.1: Auslenkungen bei gleichen Steifigkeits- und Massenverhältnissen³¹

$y(t)$ Auslenkung Pendel; $x(t)$ Auslenkung Glas

³¹ Berechnungsergebnisse mit dem Programm Double Oscillator (zms.html), Java-Script zur Simulation des Zweimassenschwingers (ETH-Zürich)

Gleiche Massen, doppelte Pendelsteifigkeit

Tabelle A 8.2: Simulation 2 mit dem Zweimassenschwinger

Prüfkörper (Glastafel)	
generalisierte Masse der Glastafel [kg]	50
Ersatzsteifigkeit der Glastafel [N/m]	395.761
Stoßkörper (DIN EN 12600)	
Masse des Stoßkörpers [kg]	50
Ersatzsteifigkeit des Stoßkörpers [N/m]	791.522
Fallhöhe [m]	0,45

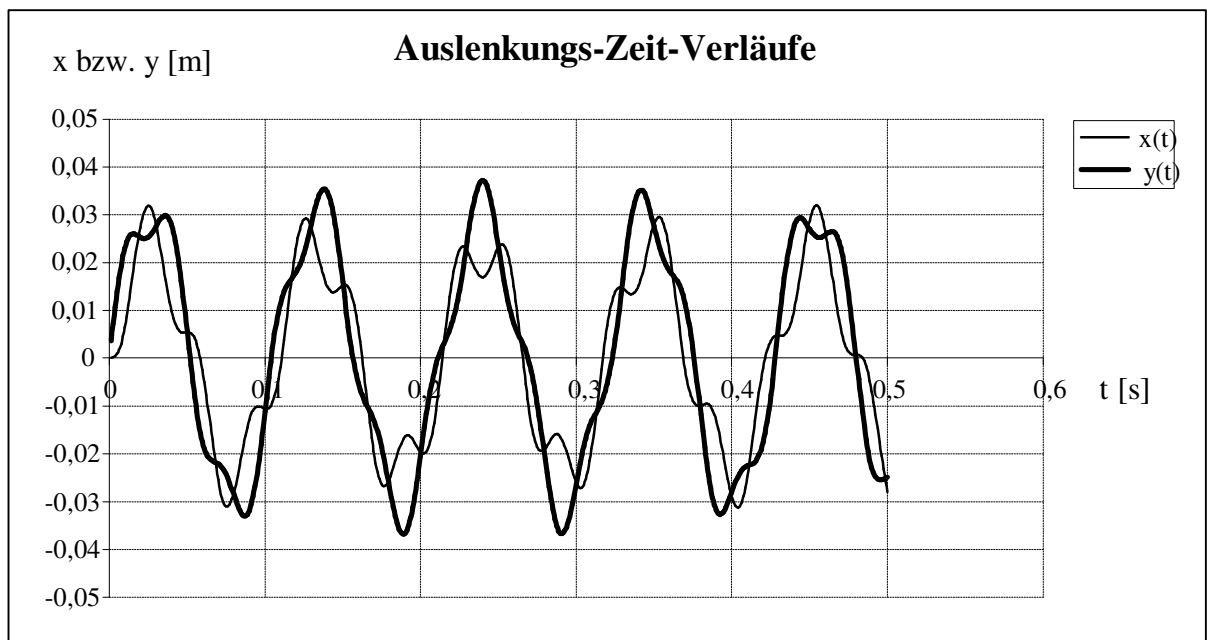


Bild A 8.2: Auslenkungen bei gleichen Massen und doppelter Pendelsteifigkeit

y(t) Auslenkung Pendel

x(t) Auslenkung Glas

Gleiche Massen, halbe Stoßkörpersteifigkeit

Tabelle A 8.3: Simulation 3 mit dem Zweimassenschwinger

Prüfkörper (Glastafel)	
generalisierte Masse der Glastafel [kg]	50
Ersatzsteifigkeit der Glastafel [N/m]	395.761
Stoßkörper (DIN EN 12600)	
Masse des Stoßkörpers [kg]	50
Ersatzsteifigkeit des Stoßkörpers [N/m]	197.881
Fallhöhe [m]	0,45

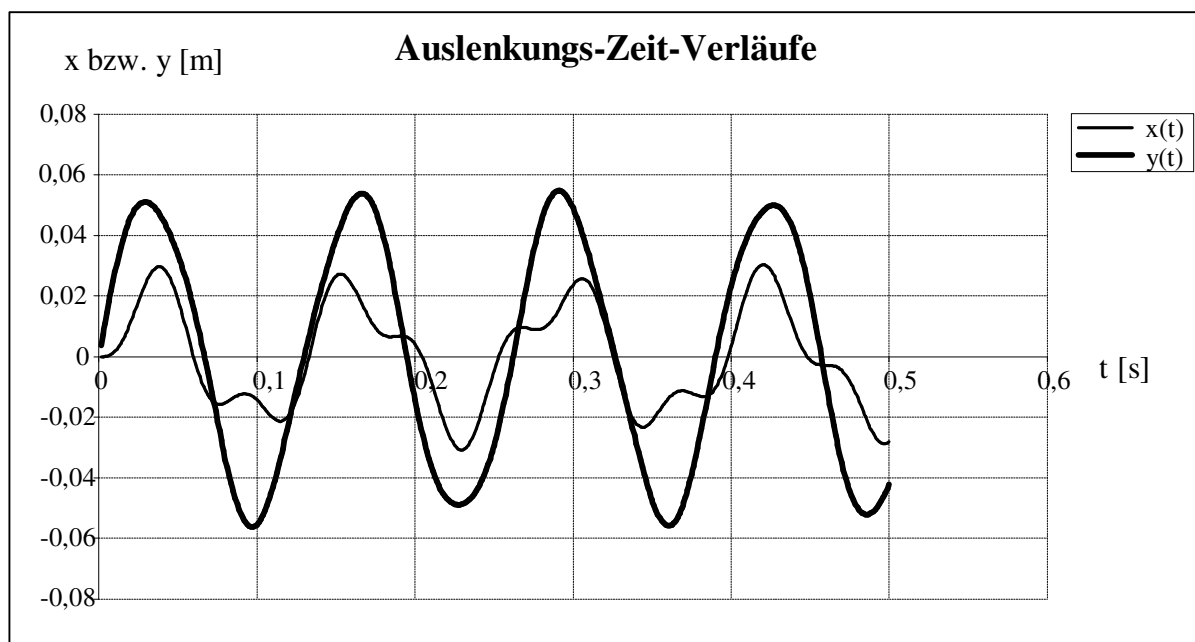


Bild A 8.3: Auslenkungen bei gleichen Massen und halbe Pendelsteifigkeit

y(t) Auslenkung Pendel

x(t) Auslenkung Glas

Geringere Glasmassen, gleiche Steifigkeit

Tabelle A 8.4: Simulation 4 mit dem Zweimassenschwinger

Prüfkörper (Glastafel)	
generalisierte Masse der Glastafel [kg]	5
Ersatzsteifigkeit der Glastafel [N/m]	395.761
Stoßkörper (DIN EN 12600)	
Masse des Stoßkörpers [kg]	50
Ersatzsteifigkeit des Stoßkörpers [N/m]	395.761
Fallhöhe [m]	0,45

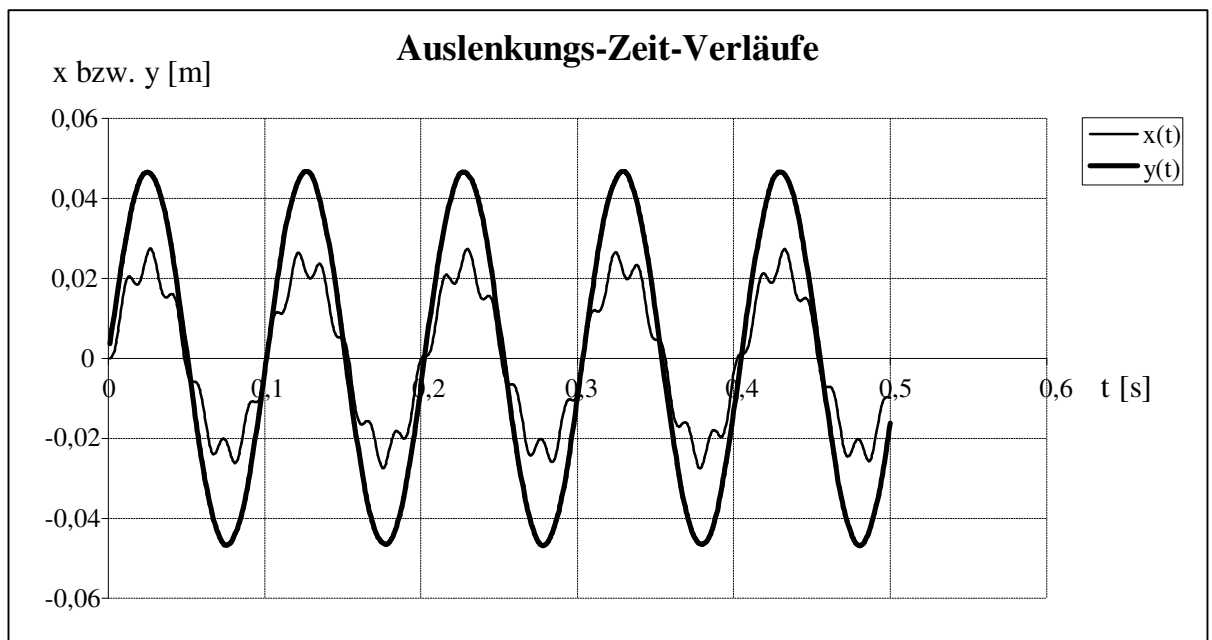


Bild A 8.4: Auslenkungen bei geringerer Massen und halber Pendelsteifigkeit

$y(t)$ Auslenkung Pendel, $x(t)$ Auslenkung Glas

Die Glastafel folgt der Schwingung des Pendels. Zusätzlich ist diese Grundschwingung mit den Eigenschwingungen der Glastafel überlagert.

Größere Glasmasse, gleiche Steifigkeit

Tabelle A 8.5: Simulation 5 mit dem Zweimassenschwinger

Prüfkörper (Glastafel)	
generalisierte Masse der Glastafel [kg]	500
Ersatzsteifigkeit der Glastafel [N/m]	395.761
Stoßkörper (DIN EN 12600)	
Masse des Stoßkörpers [kg]	50
Ersatzsteifigkeit des Stoßkörpers [N/m]	395.761
Fallhöhe [m]	0,45

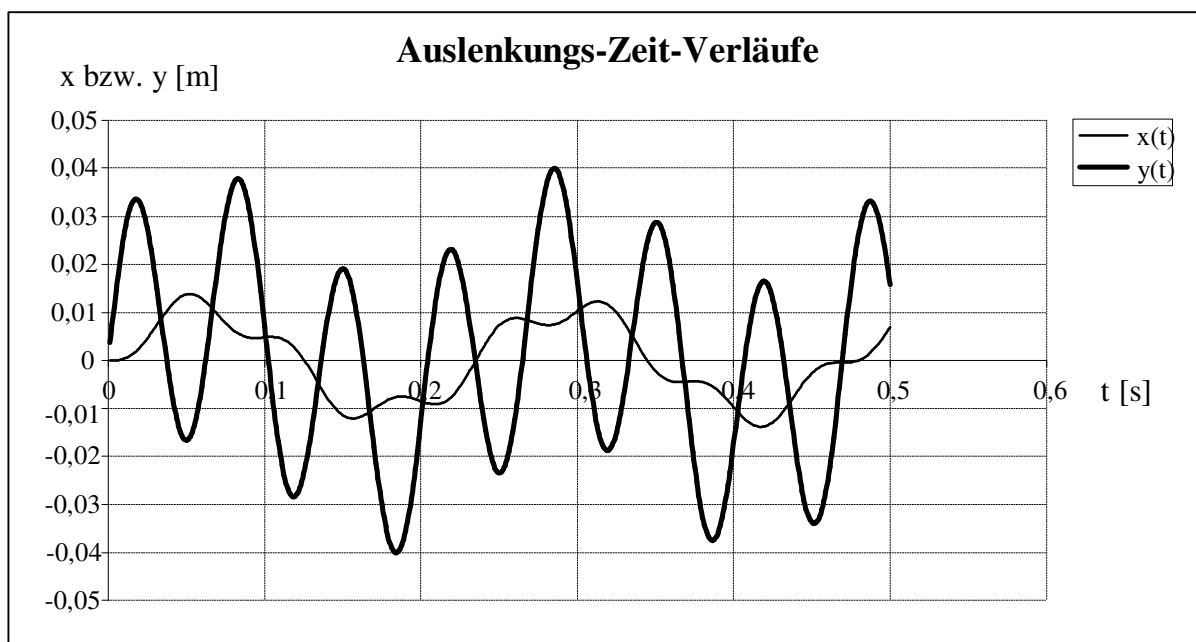


Bild A 8.5: Auslenkungen bei größerer Glastafelmasse und Originalsteifigkeit

$y(t)$ Auslenkung Pendel

$x(t)$ Auslenkung Glas

Die schwere Glastafel wird vom Pendel schwach zum Schwingen angeregt. Ihre Schwingung gibt die Grundschiwingung des Systems vor. Die Eigenschwingung des Pendels erfolgt über der Schwingung der Glastafel.

Anhang A 9: Hinsichtlich Glasbruch ausgewertete Pendelschlagversuche

Verbund-Sicherheitsgläser

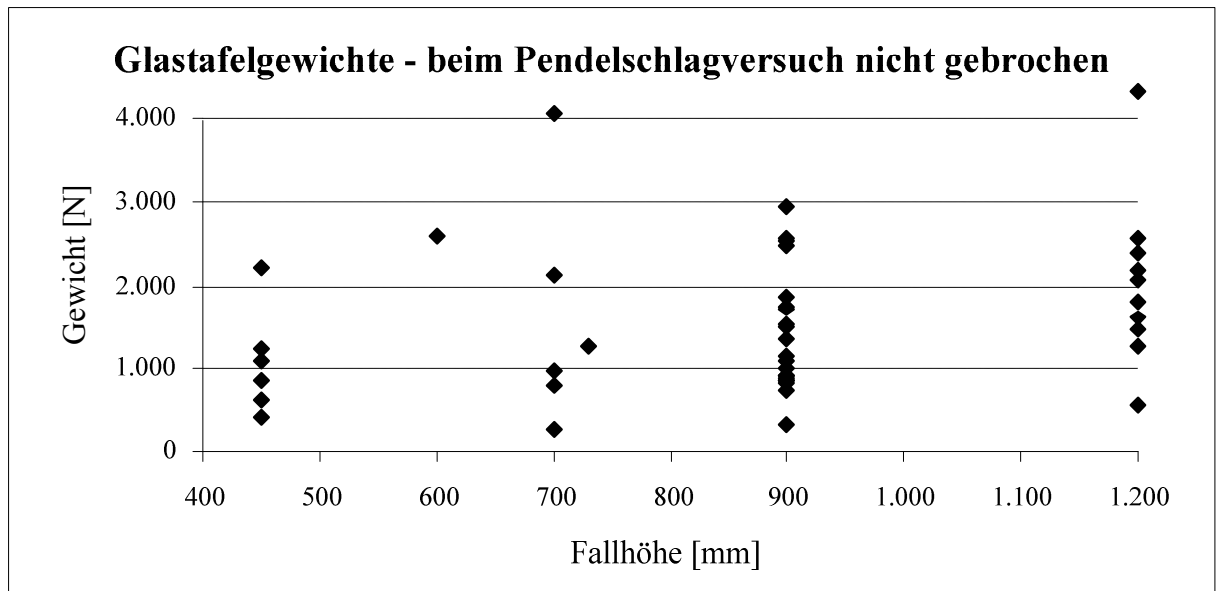


Bild A 9.1: Glastafeln die beim Bauteilversuch nicht gebrochen sind

Unabhängig von der Art der Lagerung (punktförmig, zwei-, drei-, allseitig) und der Lage des Auftreffortes, wurden Versuchsberichte von Pendelschlagversuchen nach den Kriterien: Gewicht der Glastafel und gebrochen oder intakt für verschiedene Glasarten ausgewertet. Die Punktstützung erzwingt beim Pendelschlag höhere Spannungen als die Linienlagerung vergleichbarer Abmessungen. Darauf aufbauende Versuchserfahrungen sind deshalb auch für die Linienlager aussagekräftig, da am Linienlager keine Spannungsspitzen entstehen. Bei den untersuchten Geometrien hatten die meisten Glastafeln, die im Versuch nicht gebrochen sind, ein Gewicht von über 1000 N. Bei schweren Glastafeln treten Brüche in der Regel nur bei Schlägen in Eck- oder Randnähe auf.

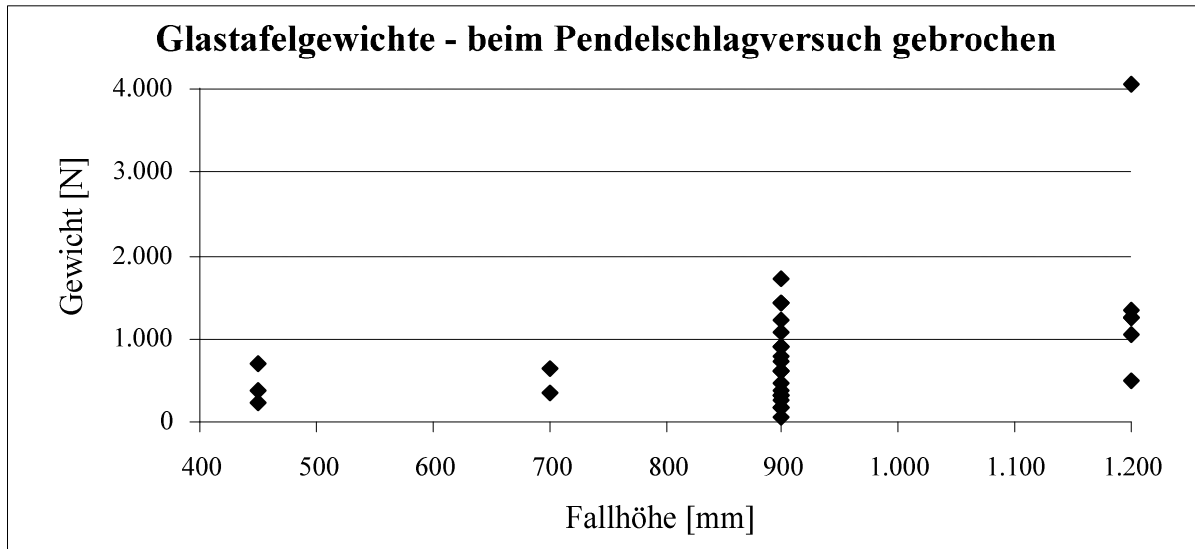


Bild A 9.2: Gewichte von Glastafeln die beim Bauteilversuch gebrochen sind

In Bild A 9.2 ist ein Glasbruch bei einer Glastafel mit einem Gewicht von über 4.000 N dargestellt. Der Bruch ist beim Auftreffort in der Glastafelecke entstanden. Die Prüfungen in Glastafelmitte hat dieser Aufbau ebenfalls ohne Glasbruch überstanden. Es ist deutlich sichtbar, dass die Bruchanzahl mit dem Gewicht abnimmt. Die meisten Glasbrüche sind bei einem Tafelgewicht unter 1.000 N aufgetreten.

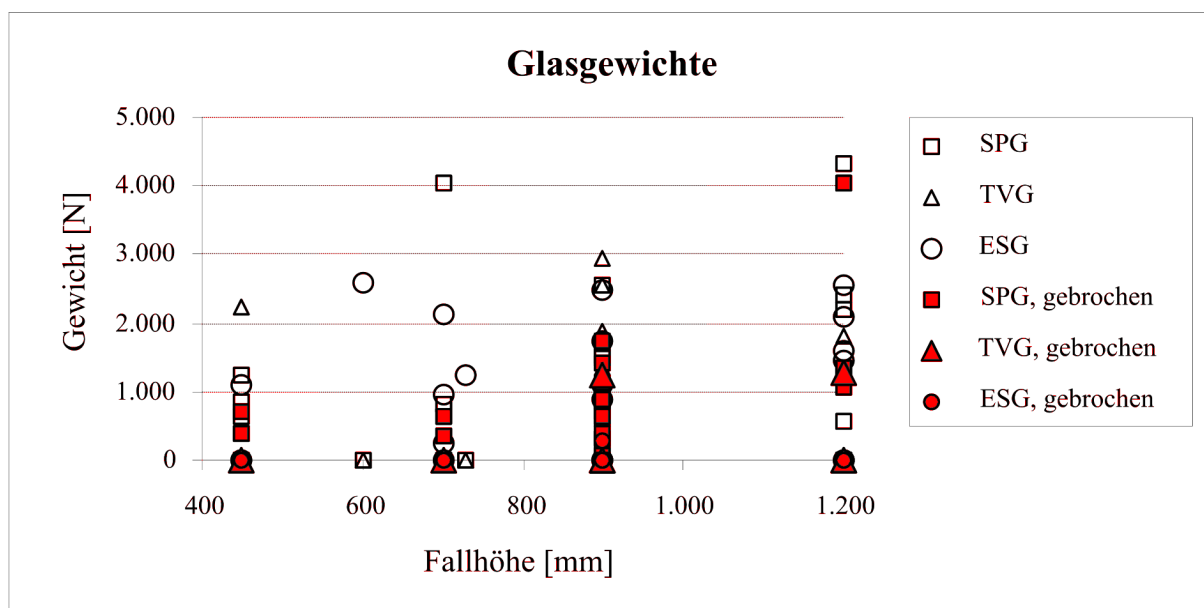


Bild A 9.3: Vergleich gebrochener und intakter Glastafeln beim Bauteilversuch mit verschiedenen Glastypen

Bild A 9.3 zeigt, dass bei Glasgewichten unter 1000 N auch viele vorgespannte Glastafeln gebrochen sind.

Mehrscheiben-Isolierverglasungen

Bei Auftrefforten in Glastafelmitte brechen schwere Glastafeln häufig nicht. Insgesamt wurden 182 Tafeln mit unterschiedlicher Geometrie ausgewertet. Bei 56 Glastafeln, die mit dem Pendelschlag geprüft wurden, wog die innere Tafel jeweils über 1.000 N. Von diesen sind lediglich 19 bei Schlägen am Rand oder in der Ecke gebrochen. Aus der Auswertung in Bild A 9.4 geht ebenfalls hervor, dass keine Innentafel mit einem Gewicht über 3.000 N gebrochen ist.

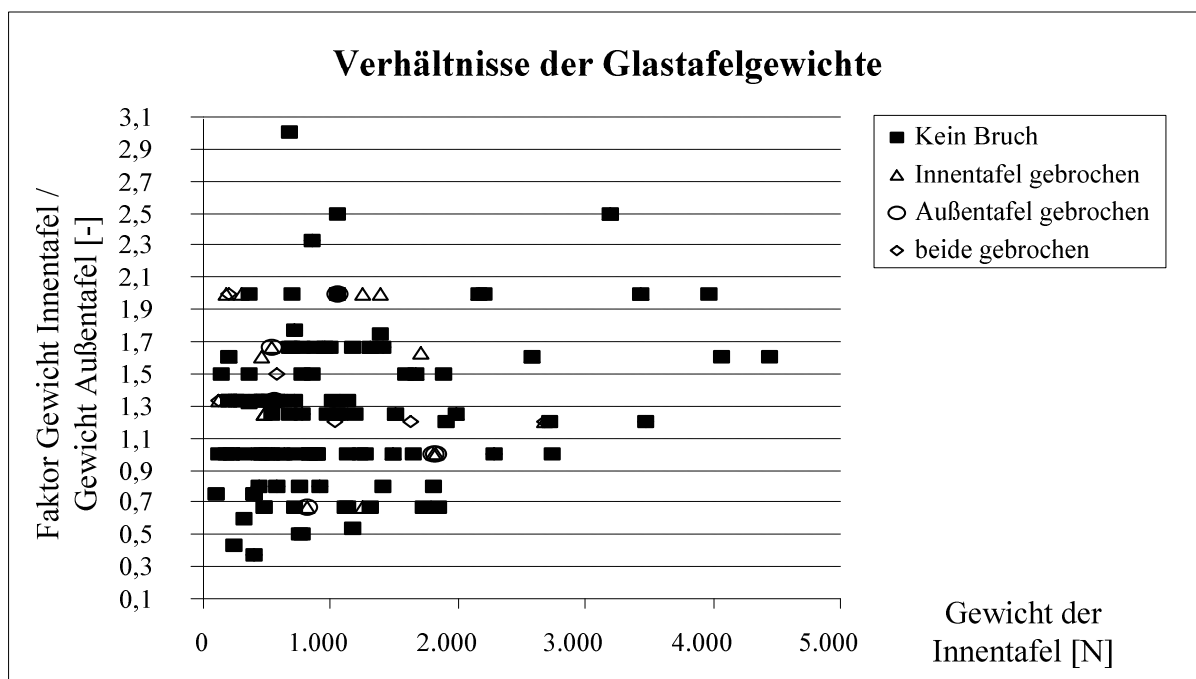


Bild A 9.4: Gewichtsverhältnis bei MSI gebrochen/ungebrochen

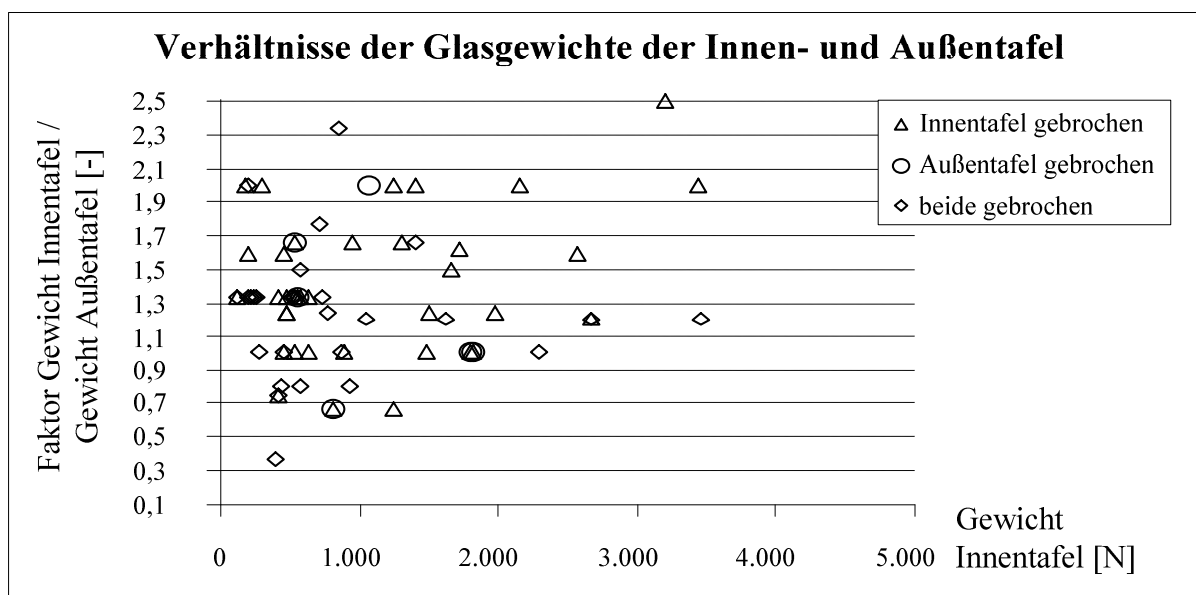


Bild A 9.5: Gewichtsverhältnis bei gebrochenen MSI

Anhang A 10: Anforderungen an eine Absturzsicherung

Geometrische Randbedingungen

Eine Absturzsicherung ist gemäß MBO § 38 „Umwehrungen“ [MBO 02] ab einer Absturzhöhe von 1,0 m erforderlich. Diese Höhenfestlegung ist zwingend einzuhalten. Abhängig von der Absturzhöhe wird die Geländerhöhe mit 0,9 m bzw. 1,1 m über 12 m Absturzhöhe festgelegt. Die [DIN 1024-2] fordert für behinderten gerechtes (barrierefrei) Bauen getrennt von der Absturzsicherung einen zusätzlichen Handlauf in 85 cm Höhe. Bei Gebäudetreppen fordert [DIN 18065] einen Holm nicht tiefer als 0,8 m und nicht höher als 1,15 m. Dieses Kriterium könnte aus Sicht des Autors zur Abgrenzung zwischen raumhohen Glastafeln (Kategorie A der TRAV) und ausfüllenden³² Glastafeln (Kategorie C) dienen. Ein tragfähiger Holm in entsprechender Höhe wird einen möglichen Anprall dämpfen und rechtfertigt damit die geringere Stoßeinwirkung bei ausfüllenden Glastafeln.

Hinsichtlich der Gestaltung der Umwehrung stellt die MBO keine Anforderungen. Lediglich in der Norm [DIN 18065] finden sich Forderungen einer maximalen Öffnungsweite von 12 cm beim Aufenthalt unbeaufsichtigter Kinder. Teilweise sind diese Forderungen als Ergänzung in den Ausführungsverordnungen zu den Landesbauordnungen aufgenommen.

Über die üblichen baurechtlichen Anforderungen zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit hinaus bestehen keine Vorgaben hinsichtlich eines Verletzungsrisikos an z. B. scharfen Glasplittern. Bei Glasbauteilen wird wegen möglicher Schnittverletzungen ESG oder VG (Literaturstelle GUV) gefordert. Eine einheitliche Vorgehensweise beim Schnitt- und Splitterschutz ist in den baurechtlichen Vorschriften nicht vorhanden. Bei Türfüllungen oder Balkontüren aus Glas wird kein Augenmerk auf eine reduzierte Schnittgefahr gelegt. Muss eine absturzsichernde Funktion erfüllt werden, sind bezügliche Anforderungen zu erfüllen.

Eingeführte technische Baubestimmungen

Brüstungen und Geländer sind Umwehrungen, denen Sicherungsfunktionen gegen Absturz von Menschen zugewiesen werden. Teilweise muss diese Funktion aber auch von Außenwänden mit ihren Wandausfachungen (Verglasungen) oder Innenwänden übernommen werden.

Drängelnde oder dagegenlehrende Menschen belasten diese Bauteile quasistatisch. Die Tragfähigkeit wird mit horizontalen –lediglich statisch angesetzten– Einwirkungen nachgewiesen.

Zusätzlich können diese Bauteile stoßartigen Belastungen infolge anprallender Menschen oder Gegenständen ausgesetzt sein. Stürzende Personen üben einen weichen Stoß (Körperstoß) auf die Verglasung aus. Bezogen auf die Steifigkeit der Konstruktion ist die Steifigkeit

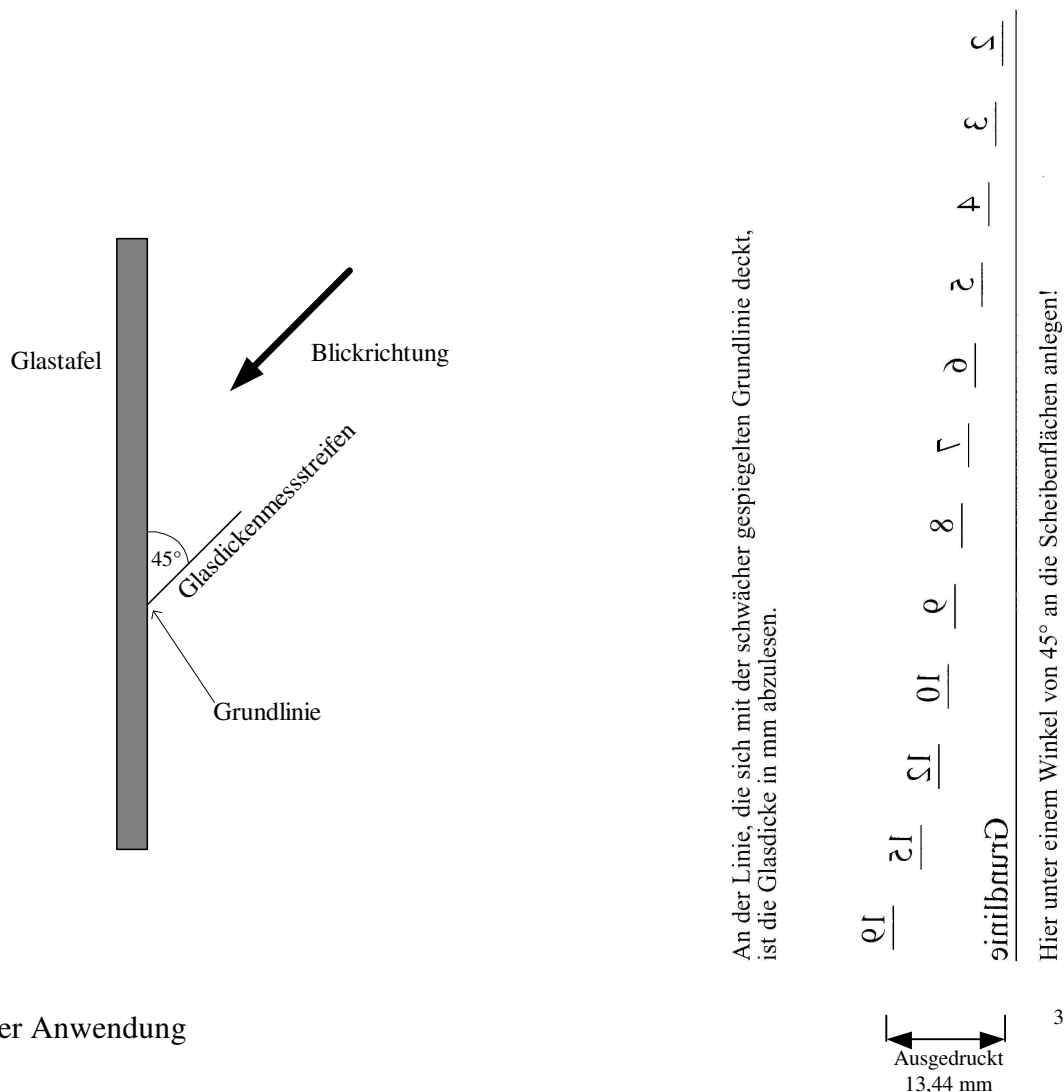
³² Im konstruktiven Glasbau hat sich für die nichtaussteifende und damit nur „ausfüllende Glastafel häufig der mechanisch falsche Begriff der „ausfachenden Verglasung“ etabliert.

des anprallenden Menschen gering. Demzufolge sind die Deformationen des Bauteils klein gegenüber den Deformationen des „Stoßkörpers“. Für die übliche Nutzung sind Laufgeschwindigkeiten bis zu 2,6 m/s (siehe Anhang A2) zu erwarten. Bei dieser Geschwindigkeit können im Glas bereits nennenswerte Beanspruchungen auftreten. Steifere Gegenstände verursachen dagegen beim Anprall den „harten Stoß“. Dieser wird von Stoßkörpern wie Möbel, Koffer etc. verursacht. In der Regel ist dabei die Masse klein aber die Steifigkeit und die Geschwindigkeit ($>10,0$ m/s) sind groß. Bauteile setzen verschiedenen Stößen unterschiedlichen Widerstand entgegen. Das Bauteilverhalten wird wesentlich vom Verhältnis der aufeinander treffenden Massen und ihren Steifigkeiten beeinflusst.

Je nach Material des Bauproduktes sind im Bauwesen unterschiedliche Normen und Regeln der Technik für absturzsichernde Konstruktionen anzuwenden. Für die Mehrzahl der Baumaterialien muss im Baurecht der Länder bei absturzsichernden Bauteilen die einheitliche technische Baubestimmung (ETB-Richtlinie) „Bauteile, die gegen Absturz sichern“ [ETB 87] angewendet werden. In der Regel haben die Länder den spröden Baustoff Glas bei dieser Nachweisform - über Anlagen bei der Veröffentlichung - ausgeschlossen. Verglasungen werden heute nach den „technischen Regeln für die Verwendung absturzsichernder Verglasungen“ [TRAV 03] beurteilt. Bauregelliste Teil C ermöglicht einige Ausfachungen aus Kunststoffen, die teilweise ebenfalls spröde brechen.

Anhang A 11: Kontrollen am ausgeführten Bauwerk

Die Glasdicke von Scheiben, die bereits eingebaut sind, kann mit dem Messstreifen in Bild A 11 kontrolliert werden. Der Messstreifen ist mit der Grundlinie unter einem Winkel von 45° an der Glastafel anzulegen. Der Betrachter sieht auf dem Messstreifen eine Linie als schwache Spiegelung der hinteren Glasoberfläche. Auf der Skala kann die Glasdicke abgelesen werden. Diese Kontrolle ist auch für Isolierglas oder die jeweils äußere Glastafel von Verbund-Sicherheitsglas geeignet.



Skizze der Anwendung

Bild A 11.1: Glasdickenmessstreifen aus [Pi 99]

³³ Ist der Maßstab ausgedruckt nicht 13,44 mm lang, so muss der Ausdruck skaliert werden.

Anhang A 12: Variationskoeffizient von Glas

Die Verteilung der Streuung der Zugfestigkeit von Glas kann unter Annahme einer WEIBULL-Verteilung ausreichend genau dargestellt werden. Die zweiparametrische WEIBULL-Verteilung hat die Summenwahrscheinlichkeitsfunktion gemäß (1).

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_p}{\Theta} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

Mit:

σ_p Zugspannung in der Glasprobe

$F(x)$ Wahrscheinlichkeit, dass die Bruchspannung des Glases kleiner σ_p ist, d.h. das Glas ist schon gebrochen, [z. B. $F(\text{ESG}, 120 \text{ N/mm}^2) = 0,05$]

Θ feste Vergleichsspannung, Lageparameter

β Steigung der WEIBULL-Verteilung, Formparameter

Fügt man im Zähler wie im Nenner der runden Klammer noch ein $-\varepsilon$ hinzu, verschiebt also den Ursprung längs der x-Achse, dann hat man die dreiparametrische WEIBULL-Verteilung. Bei der WEIBULL-Verteilung gibt [Kü 01] für diese Größen an:

Standardabweichung (2)

$$\sigma = \text{Var}(x) = \sqrt{\Theta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) - \left\langle \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right\rangle^2 \right]} \quad (2)$$

Mittelwert (3)

$$\mu = E(x) = \Theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3)$$

Mit:

Γ Gamma- Funktion

Allgemein gilt für den Variationskoeffizienten (4) nach [Gr 81]:

$$\text{Variationskoeffizient} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

In Tabelle A 12.1 wurden die Variationskoeffizienten für mehrere Versuchsreihen ausgewertet. Der Variationskoeffizient von 0,26 wurde in [Br 89] ermittelt und ist von anderen Arbeiten bestätigt. Für eine sichere und wirtschaftliche Bemessung wird in dieser Arbeit mit diesem Wert weitergearbeitet.

Tabelle.A 12.1: Variationskoeffizienten der Biegezugfestigkeit von Glas

Glasart, Zustand, (Versuchszahl)	Mittelwert [N/mm²]	Standardabweichung [N/mm²]	Variationskoeffizient	Parameter der Weibull-Verteilung	Quelle
SPG, 20 Jahre alt nicht vorgeschädigt	31,31	4,65	0,148	$\beta = 25$ $\Theta = 32 \text{ N/mm}^2$	[Se 99]
6mm SPG, ungeschädigt 20°C	39,24	6,14	0,16	$\beta = 22,4$ $\Theta = 40,2 \text{ N/mm}^2$	[Gr 03]
„Großer Ringversuch“, Glas verschiedener Hersteller	-	-	0,26	-	[Br 89]
4 mm SPG, neu, ohne Vorschädigung, (20 Probekörper)	109,4	-	0,33	$\beta = 3,36$ $\Theta = 121,4 \text{ N/mm}^2$	[Fi 00]
4 mm SPG, neu, Korundberieselung, (20 Probekörper, Prüfung direkt nach der Schädigung)	32,8	-	0,058	$\beta = 21,5$ $\Theta = 33,6 \text{ N/mm}^2$	Formparameter Lageparameter
4 mm SPG, neu, Korundberieselung, (20 Probekörper, Prüfung nach 96 h Lagerung an der Luft)	38,8	-	0,088	$\beta = 13,9$ $\Theta = 40,2 \text{ N/mm}^2$	
4 mm SPG, neu, Korundberieselung, (20 Probekörper, Prüfung nach 60 d Wasserlagerung)	51,2	-	0,11	$\beta = 11,1$ $\Theta = 53,5 \text{ N/mm}^2$	(siehe Anhang A 12: Variationskoeffizient von Glas)
2-4 mm Tafelglas, Alter etwa 48 Jahre, Fensterverglasungen an der TUD, normale Nutzung	-	-	0,25	$\beta = 4,57$ $\Theta = 88 \text{ N/mm}^2$	
4 mm SPG, neu, ohne Vorschädigung, (107 Probekörper)	-	-	0,15	$\beta = 7,65$ $\Theta = 125,6 \text{ N/mm}^2$	
Vergleich mit dem Regelwerk					
Grundlage für $\gamma_R = 1,8$	-	-	0,26	-	[DIN13474]
Vergleich mit anderen Baustoffen					
Zugfestigkeit von Baustahl	-	-	$\approx 0,06$	-	-
Beton auf Druck	-	≈ 5	$\approx 0,2$	-	-

Anhang A 13: Umfrage bei neun Prüfern von Prüfstellen, die insgesamt ca. 1.800 Pendelschlagversuche durchgeführt haben

Für diese Arbeit wurden verschiedene Prüfstellen nach Erfahrungen aus den Pendelschlagversuchen befragt. Ziel war, die „zusätzlichen Maßnahmen“ nach Kapitel 0 daraus praxisnah zu aufzustellen. In den Bildern A 13.1 bis A 13.4 sind die Fragestellungen mit der Anzahl der Antworten dargestellt.

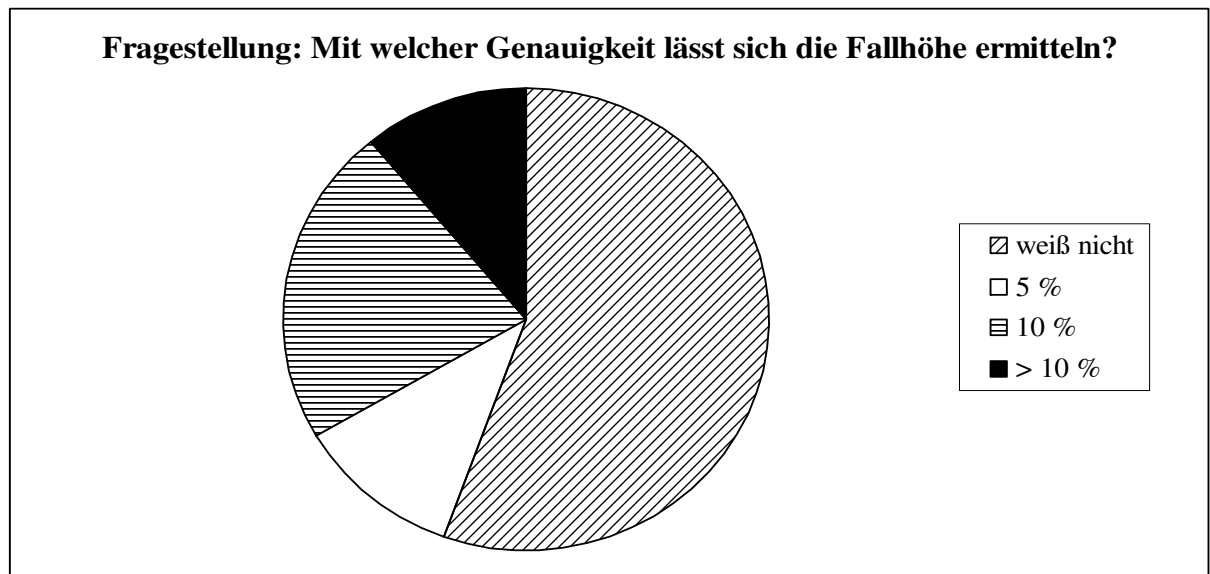


Bild A 13.1: Einschätzung zur Versuchsgenauigkeit

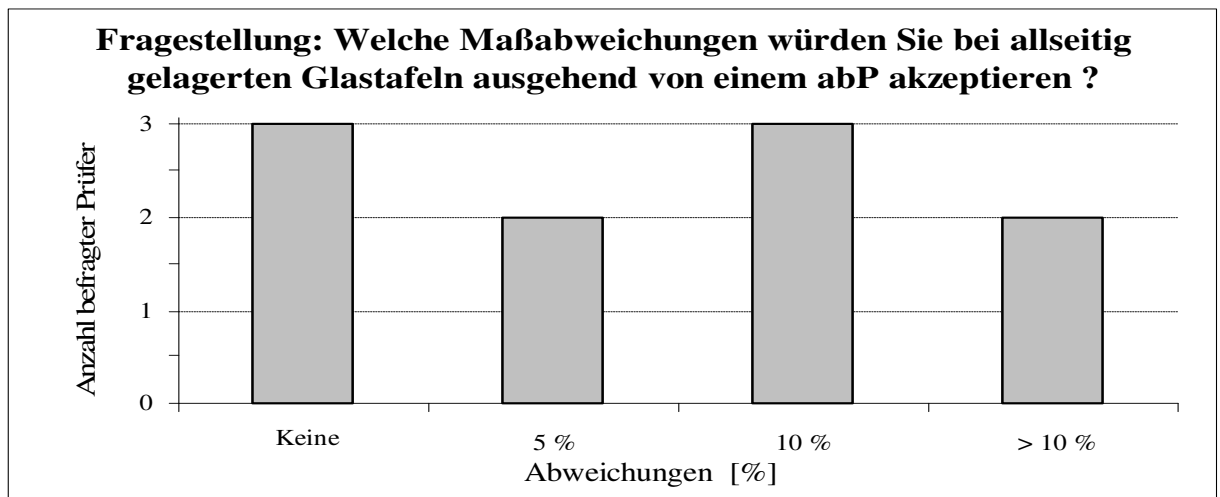


Bild A 13.2: Einschätzung möglicher Geometrieabweichungen

Das Bild A 14 zeigt, dass Personen die viel Erfahrung mit Pendelschlagversuchen haben, uneinig sind, inwieweit Erfahrungen aus Versuchen auf andere Geometrien übertragen werden können. Die rechnerische Simulation mit der FE – Methode bietet hier ein Mittel, mit dem diese Fragestellung eindeutig beantwortet werden könnte.

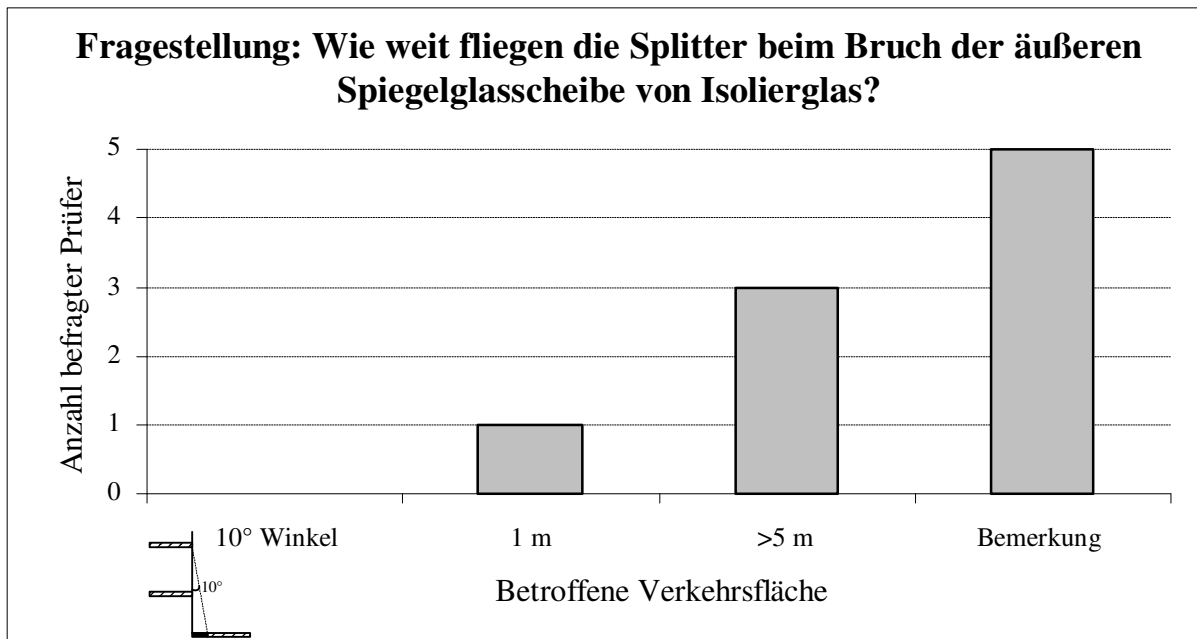


Bild A 13.3: Betroffene Verkehrsflächen bei Bruch der äußeren Tafel

Häufig werden bei MSI die äußeren Glastafeln aus SPG hergestellt. Dieser Aufbau ist nicht unkritisch, da Bruchstücke auf darunterliegende Verkehrsflächen fallen können. Zu Bild A 13.3 sind folgende Bemerkungen anzuführen:

- SPG-Bruchstücke ‚...segelten...‘ nach dem Pendelstoß über viele Meter
- Die Bruchstücke flogen über 5 m
- Hängt davon ab, wie das Spiegelglas bricht
- Abhängig von Kategorie und Gebäudehöhe
- Bei einer Prüfung im 1. OG flogen die SPG-Bruchstücke quer über die ganze Fußgängerzone (ca.30 m)

Die weit verbreitete Meinung, dass Bruchstücke nach dem Anprall nur mit einem maximalen Winkel von 10° herunterfallen ist damit widerlegt. Auch wenn die innere VSG-Schicht im gebrochenen Zustand den Anprall auffangen kann, ist es kritisch als äußere Glastafel ein SPG einzubauen.

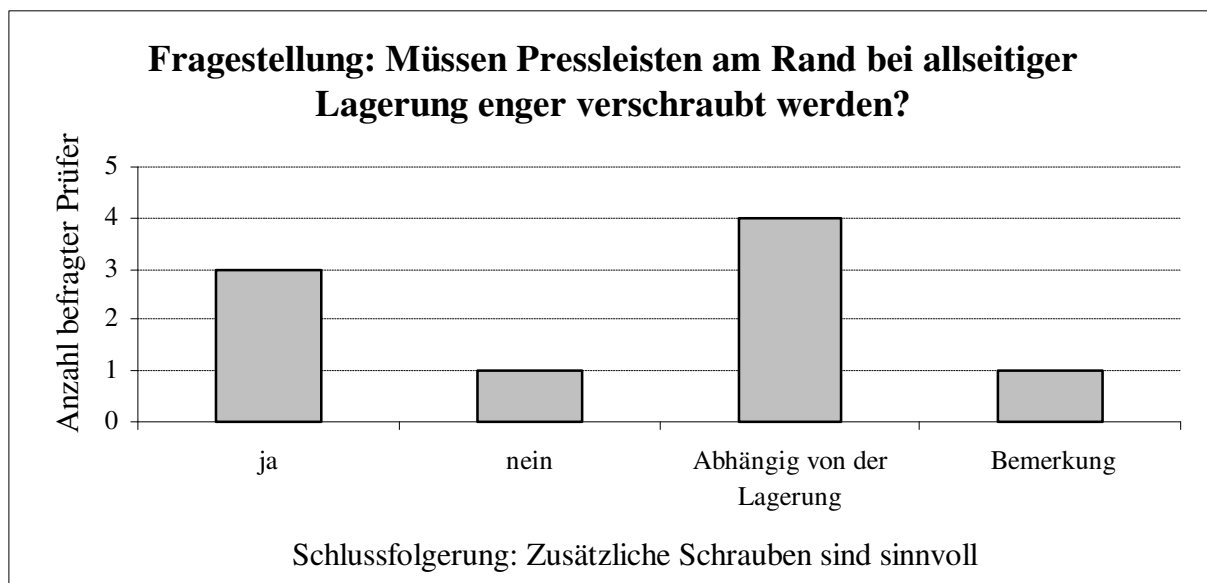


Bild A 13.4: Schraubenanordnung am Ende von Pressleisten

Ein häufiger Schaden bei Pendelschlagversuchen war das Herausbrechen von Pressleisten auch gegen die Stoßrichtung (vergleiche Bild 3.39). Zahlreiche Systeme wurden saniert, indem am Pressleistenende zusätzliche Schrauben angebracht wurden. In Bild A 13.4 sind die diesbezüglichen Antworten dokumentiert. Die Bemerkung bezog sich nur auf den Schadensfall, wenn die Pressleisten beim Anprall herausgeschlagen werden.

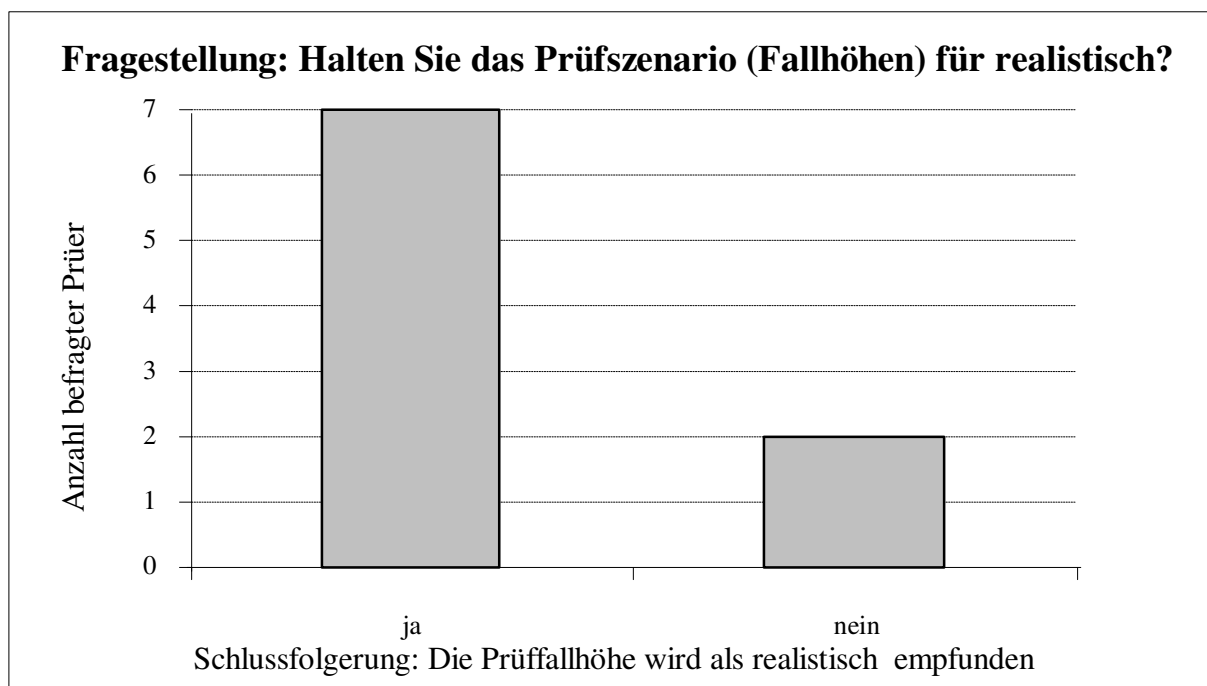


Bild A 13.5: Prüfzenario

Die Fragestellung ob die Fallhöhe realistisch ist (Bild A 13.5) bzw. ob eine Unterscheidung des Anlaufweges (Bild A 13.6) sinnvoll wäre geht auf den gleichen Hintergrund zurück. Zwei

Prüfer könnten sich eine Reduzierung der Fallhöhe des Stoßkörpers „... auf Treppenläufen und in schmalen Fluren parallel zur Laufrichtung ...“ vorstellen.

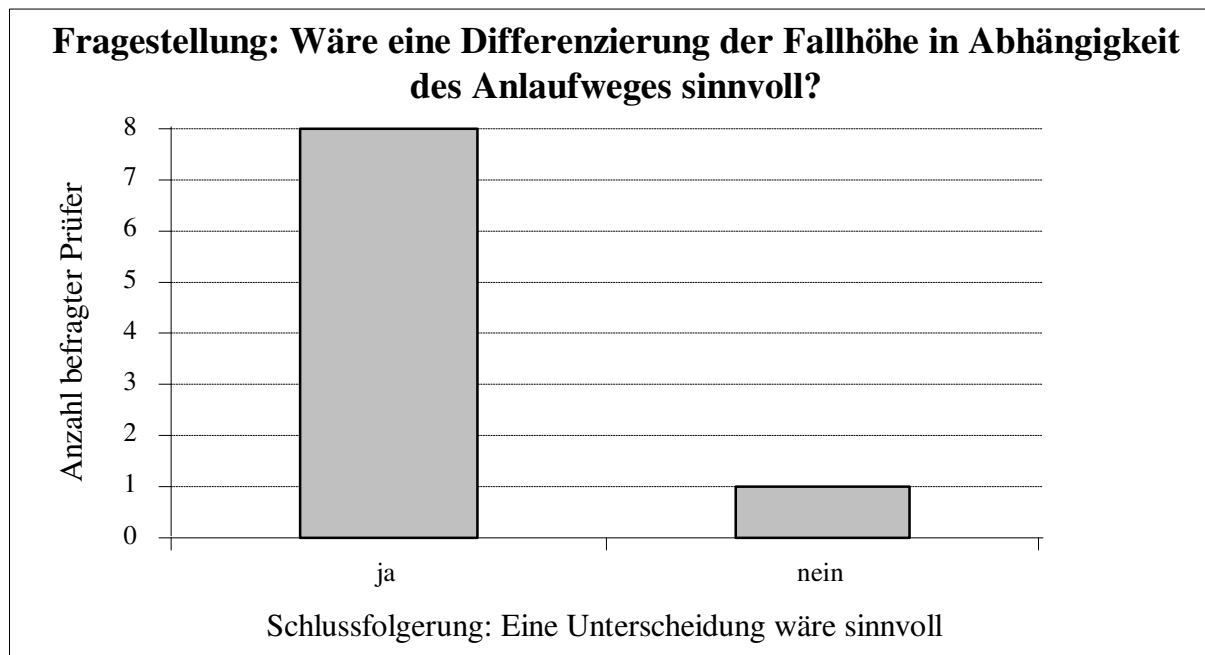


Bild A13.6: Unterscheidung des Anlaufweges

Bei einer FE – Simulation können im Einzelfall besondere Annahmen getroffen werden. Z. B. könnte der Dummy mit einer zuvor festgelegten Geschwindigkeit als Stoßkörper verwendet werden.

Anhang A 14: LS-DYNA Eingabedatensätze

Pendel

*KEYWORD
\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
\$ LS-DYNA(970) DECK WRITTEN BY :
\$ ENGINEER: Dipl.-Ing. S. Brendler
\$ PROJECT: Pendel nach DIN EN 12600
\$ UNITS: mm kg ms kN
\$ TIME:
\$ VERSION 43: validierter Pendelkoerper 18.08.03 (Modell mit Schalen)
\$ DATE : 18.08.2003
\$ 14.04.2004 keine Reibung
\$ pendel_shellV14_nf.inc (no friction)
\$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*TITLE
Stoßkörper Version 43
\$=====Impaktor (Stahl)===
*PART_INERTIA
\$ title
Torus Impaktor
\$ PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID
1000001 1000001 1000001 0 0 0 0 0
\$ XC YC ZC TMass IRCS NODEID
525.0 -220.0 1027.28 47.784
\$ Inertia tensor
\$ IXX IXY IXZ IYY IYZ IZZ
828.34 0.57E-4 0.57E-4 828.34 0.0 202.62
\$ VTX VTY VTZ VRX VRY VRZ
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
\$-----
*SECTION_SHELL
\$ SECID ELFORM SHRF NIP PROPT QR/IRID ICOMP SETYP
1000001 0 0.0000000 3.0000000 0.0000000 0.0000000 0
\$ T1 T2 T3 T4 NLOC MAREA
2.500000 2.500000 2.500000 2.500000 0.0000000
*MAT_RIGID
\$ Nur für Impaktorschalen
\$ MID RO E PR N COUPLE M ALIAS
1000001 7.3433e-9 .210.0 0.3 0.0000000 0.0000000 0.0000000
\$ CMO CON1 CON2
1.0000000 1.0000000 5.0000000
\$LCO_OR_A1 A2 A3 V1 V2 V3
0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000

\$								
\$=====Gummireifen===								
*PART								
Reifen								
\$	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
	1000002	1000002	1000002	0	1000002	0	0	0
*PART								
Reifen								
\$	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
	1000003	1000002	1000002	0	1000002	0	0	0
*SECTION_SHELL								
\$	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
	1000002	0	0.0000000	3.0000000	0.0000000	0.0000000	0	
\$	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA		
	04.00000	04.00000	04.00000	04.00000	0.0000000			
*MAT_ELASTIC								
\$	MID	RO	E	PR	DA	DB		
	1000002	2.0e-6	0.027	0.4	0.0	0.0	0.0	
*HOURGLASS								
\$	HGID	IHQ	QM	IBQ	Q1	Q2	QB	QW
\$	1000002	1	0.10	1	1.5	6.0E-2	0.0	0.0
	1000002	5	0.10	1	1.5	6.0E-2	0.0	0.0
\$								
\$=====SEIL=====								
*PART								
Seil als Pendelstab								
\$	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
	1000004	1000004	1000004	0	1000004	0	0	0
*SECTION_BEAM								
	1000004	3						
17.7								
\$								
*MAT_ELASTIC								
\$ Seil								
\$	MID	RO	E	PR	DA	DB		
	1000004	7.85e-6	.210.0	0.3	0.0	0.0	0.0	
*HOURGLASS								
\$	HGID	IHQ	QM	IBQ	Q1	Q2	QB	QW
	1000004	1	0.10	1	1.5	6.0E-2	0.0	0.0
*BOUNDARY_SPC_NODE								
\$ Oberer Haltepunkt des Seiles								
\$	NODE	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFR
	1008387	0	1	1	1	0	0	1
\$=====								
*AIRBAG_SIMPLE_PRESSURE_VOLUME_1								
	1000202	1	0	0.0000000	0.0000000	1.0		

0.0000000 0.9300000 1000501									
*AIRBAG_SIMPLE_PRESSURE_VOLUME_1									
1000203 1 0 0.0000000 0.0000000 1.0									
0.0000000 0.9300000 1000501									
*SET_PART_LIST									
\$ SID DA1 DA2 DA3 DA4									
1000202									
1000002									
*SET_PART_LIST									
\$ SID DA1 DA2 DA3 DA4									
1000203									
1000003									
*DEFINE_CURVE									
\$ LCID SIDR SFA SFO OFFA OFFO DATTYP									
1000501 2									
\$ Aufgeblasen auf 4 bar!									
\$ Hier: Druck als Funktion des relativen Volumens=V1/V0									
\$ aus allg. Gasgesetz: p0 * V0 = m*R*T = p1 * V1									
\$ da im Reifen T=m=R= const. gilt erhält man diese Kurve:									
\$ p1=p0/relVol									
\$=====									
\$ 5.50 bar im Startvolumen kommt 4,0 bar vor dem Aufschlag (Relaxation 0.0005)									
\$ relVol p									
0.5000000 1.1000E-03									
0.6000000 9.1667E-04									
0.7000000 7.8571E-04									
0.8000000 6.8750E-04									
0.9000000 6.1111E-04									
0.9500000 5.7895E-04									
1.0000000 5.5000E-04									
1.0500000 5.2381E-04									
1.1000000 5.0000E-04									
1.2000000 4.5833E-04									
1.3000000 4.2308E-04									
1.4000000 3.9286E-04									
1.5000000 3.6667E-04									
\$=====									
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE									
\$ Obere Reifenschale gegen Zielbauteil									
\$ SSID MSID SSTYP MSTYP SBOXID MBOXID SPR MPR									
1000300 1000301 2 2 1000401 1000401 0 0									
\$ FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT									
0.3500000 0.3000000 1.0000000 0.0000000 20.000000 0 0.0000000 1.0000E20									
\$ SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSF									
0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000 1.0000000 1.5000000 0.0000000 0.0000000									
\$O-A SOFT SOFSCL LCIDAB MAXPAR PENTOL DEPTH BSORT									

FRCFRQ								
1	0.0000000	0	0.0000000	0.0000000	0	0	0	
\$O-B	PENMX	THKOPT	SHLTHK	SNLOG	ISYM	I2D3D	SLDTHK	
SLDSTF								
0.000000	0	0	0	0	0			
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE								
\$ Untere Reifenschale gegen Zielbauteil								
\$	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
1000300	1000302	2	2	1000401	1000401	0	0	
\$	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
\$	0.3500000	0.3000000	1.0000000	0.0000000	20.000000	0	0.0000000	1.0000E20
0.1000000	0.3000000	1.0000000	0.0000000	20.000000	0	0.0000000	1.0000E20	
\$	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	1.0000000	1.5000000	0.0000000	0.0000000	
\$O-A	SOFT	SOFSCL	LCIDAB	MAXPAR	PENTOL	DEPTH	BSORT	
FRCFRQ								
1	0.0000000	0	0.0000000	0.0000000	0	0	0	
\$O-B	PENMX	THKOPT	SHLTHK	SNLOG	ISYM	I2D3D	SLDTHK	
SLDSTF								
0.000000	0	0	0	0	0			
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE								
\$ Obere gegen untere Reifenschale								
\$	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
1000301	1000302	2	2	1000402	1000402	0	0	
\$	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
\$	0.3500000	0.3000000	1.0000000	0.0000000	20.000000	0	0.0000000	1.0000E20
0.1000000	0.3000000	1.0000000	0.0000000	20.000000	0	0.0000000	1.0000E20	
\$	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
1.5000000	1.5000000	0.0000000	0.0000000	1.0000000	1.0000000	0.0000000	0.0000000	
\$O-A	SOFT	SOFSCL	LCIDAB	MAXPAR	PENTOL	DEPTH	BSORT	
FRCFRQ								
2	0.2000000	0	0.0000000	0.0000000	0	0	0	
\$O-B	PENMX	THKOPT	SHLTHK	SNLOG	ISYM	I2D3D	SLDTHK	
SLDSTF								
0.000000	0	0	0	0	0			
*SET_PART								
1000301								
1000002								
*SET_PART								
1000302								
1000003								
*DEFINE_BOX								
\$	boxid	xmm	xmx	ymn	ymx	zmn	zmx	
1000401	316.0	724.0	-100.0	-20.0	930.0	1120.0		
*DEFINE_BOX								
\$	boxid	xmm	xmx	ymn	ymx	zmn	zmx	
1000402	273	756	-450	-35	910	1170		

*CONTROL_TERMINATION									
\$ ENDTIM ENDCYC DTMIN ENDENG ENDMAS									
85.00	0	0.0	100.0	1.0					
*CONTROL_TIMESTEP									
\$ DTINIT TSSFAC ISDO TSLIMIT DT2MS LCTM ERODE MS1ST									
0.0	0.6	0	0.0	-0.8e-4	0	0	0		
*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION									
\$ NRCYCK DRTOL DRFCTR DRTERM TSSFRD IRELAL EDTTL IDRFLG									
.000	0.005			1	-1				
*CONTROL_ACCURACY									
\$ OSU INN PIDOSU									
0	2	0							
*CONTROL_BULK_VISCOSITY									
\$ Q2 Q1 TYPE									
0.0	0.0	-1							
*CONTROL_CONTACT									
\$ SLSFAC RWPNAL ISLCHK SHLTHK PENOPT THKCHG ORIEN ENMASS									
0.1	0.0	2	2	1	0	1	0		
\$ USRSTR USRFRC NSBCS INTERM XPENE SSTHK ECDT TIEDP									
0	0	0	0	0.0	0	0	0		
\$ SFRIC DFRIC EDC VFC TH TH_SF PEN_SF									
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
\$ IGNORE FRCENG									
0	0								
*CONTROL_CPU									
0.0									
*CONTROL_ENERGY									
\$ HGEN RWEN SLNTEN RYLEN									
1	2	2	1						
*CONTROL_HOURLASS									
\$ IHQ QH									
5	0.0								
*CONTROL_OUTPUT									
\$ NPOPT NEECHO NREFUP IACCOP OPIFS IPNINT IKEDIT IFLUSH									
1	3	0	0	0.0	0	1000	0		
\$ IPRTF									
0									
*CONTROL_SHELL									
\$ WRPANG ESPORT IRNXX ISTUPD THEORY BWC MITER PROJ									
0.0	1	-1	0	0	2	1	0		
\$ ROTASCL INTGRD LAMSHT									
0.0	0	0							
\$=====									
*DATABASE_BINARY_D3PLOT									
\$ DT/CYCL LCDT BEAM NPLTC									
0.5	0	0	0						

2.5	0	0	0					
*DATABASE_BINARY_RUNRSF								
\$ DT/CYCL								
.00000	0							
*DATABASE_EXTENT_BINARY								
\$	NEIPH	NEIPS	MAXINT	STRFLAG	SIGFLAG	EPSFLG	RTFLG	ENGFLG
\$	Dehnungen			Spannungen				
	0	0	5	1	1	1	2	1
\$	0	0	0	1	1	1	1	1
	0	1	0	0	0	0	0	
\$*DATABASE_EXTENT_MPGS								
\$ 3								
*DATABASE_ABSTAT								
0.1								
*DATABASE_ELOUT								
0.1								
*DATABASE_GLSTAT								
0.1								
*DATABASE_MATSUM								
0.5								
*DATABASE_NODOUT								
0.1								
*DATABASE_RCFORC								
0.1								
*DATABASE_SLEOUT								
	0.1	1						
\$ Tafel 4 Element Nr. 82213 82228 84628 84613								
\$ Tafel 1 Element Nr. 96613 96643 94213 94243								
*DATABASE_HISTORY_SHELL								
\$ S16 Mitte								
910430								
911120								
*DATABASE_HISTORY_NODE								
277762								
\$=====								
\$ Durch Auskommentieren der entsprechenden Fallhöhen wird hier die								
\$ Anfangsgeschwindigkeit definiert (überschreibt die entsprechenden								
\$ Werte in der Karte *PART_INTERIA)								
*INITIAL_VELOCITY								
\$	nsid	nsidex	boxid	IRIGID				
		1000402	-1					
\$	vx	vy	vz	wx	wy	wz		
\$ Fallhöhe 900mm (siehe auch weiter oben)								
\$	0.0	3.65	0.0					
\$ Fallhöhe 700mm								
\$	0.0	3.44	0.0					

\$ Fallhöhe 450mm
0.0 2.9714 0.0
\$=====
\$ Hier steht das Part aus der Versuchsaufbau, gegen welches gependelt wird
\$ -> Kontaktdefinition siehe pendel_shells.inc
*SET_PART
1000300
16
\$=====
\$ Erdbeschleunigung
*LOAD_BODY_PARTS
\$ PSID
982
*SET_PART_LIST
982
16
*LOAD_BODY_Z
\$ LCID SCF
981 0.009810
*DEFINE_CURVE
981
0.0 1.0
1000.0 1.0
*END

Anhang A 15: Berechnungsbeispiele

A 15.1 Starre Wand

Die potentielle Energie bei einer Fallhöhe von 450 mm wird nach dem Auslösen des Pendels in kinetische Energie umgewandelt. Am Tiefpunkt des Pendels, direkt vor dem Anprall des Stoßkörpers gegen den Prüfkörper wurde die potentielle Energie komplett in kinetische Energie umgesetzt. Die Zeitachse in Bild A 15.1 beginnt bei 0 ms direkt vor dem Anprall. Die kinetische Stoßenergie wird in der Kompressionsphase mit dem Zusammendrücken des Stoßkörpers in elastische Energie umgewandelt. In der Dekompressionsphase entspannt sich der Stoßkörper wieder. Die elastisch gespeicherte Energie wird wieder freigegeben und der Stoßkörper beim Rückprall auf die Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt. Die starre Wand erhält keine elastische oder kinetische Energie.

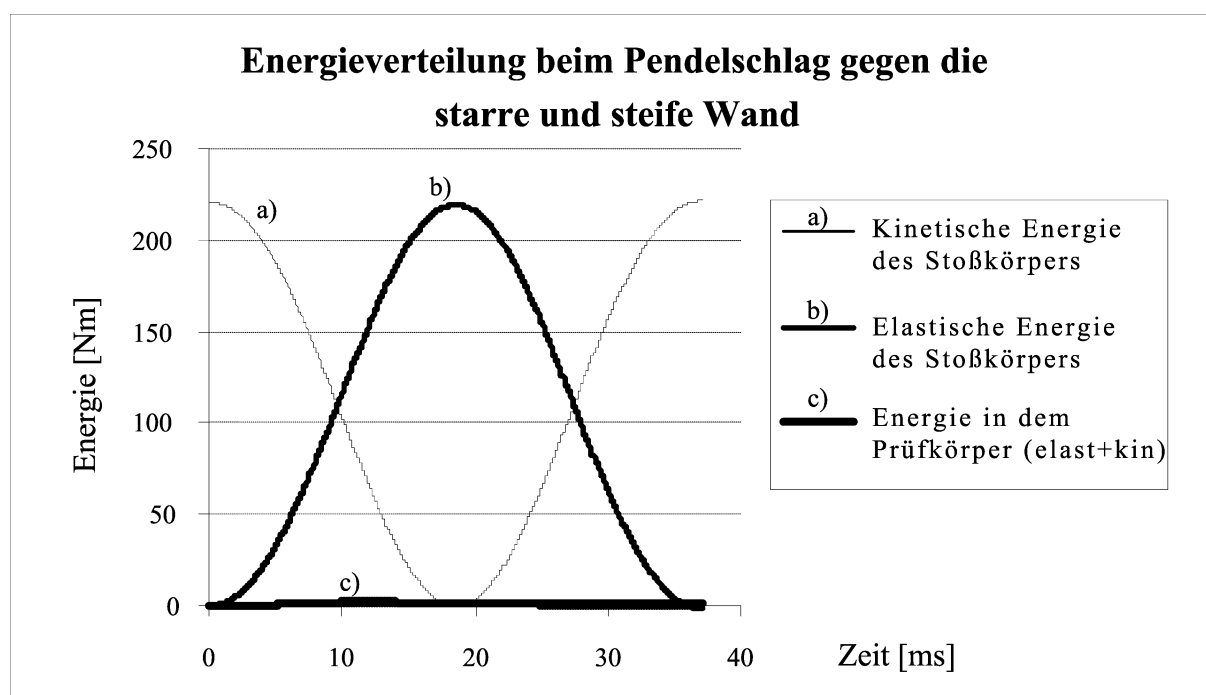


Bild A 15.1: Energieverteilung beim Stoß gegen die starre Wand

A 15.2 Glastafel 8 x 1050 x 2.056

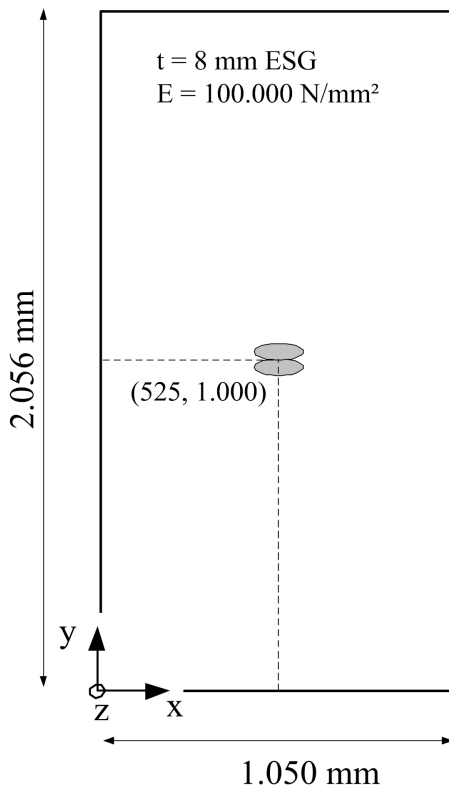


Bild A 15.2: Abmessungen, Aufbau und Auftreffort

In diesem Beispiel wird die Glastafel aus Kapitel 0 entsprechend des Bemessungsvorschlags (Kapitel 4) untersucht. Die Abmessungen sind in Bild A 15.2 dargestellt. In der Berechnung wird der dynamische Elastizitätsmodul von Glas verwendet. Beim ersten Pendelschlag mit einer Fallhöhe von 450 mm entsteht eine Stoßkörperkraft von 9.987 N (Tabelle A 15.1). Damit liegt eine „leichte“ Glastafel vor, die weiter untersucht werden muss. Iterativ wird die Fallhöhe gesteigert und die von der Glastafel aufgenommene Energie ermittelt. Bei einer Fallhöhe von 650 mm wurde der Bemessungswert der Einwirkung ($E_{d,aG}$), die erforderliche Nachweisenergie, in die Glastafel übertragen. Die Verteilung der elastischen und kinetischen Energien ist in Bild A 15.3 dargestellt. Diese Glastafel könnte dennoch nicht als absturzhemmend eingestuft werden, da unter Einwirkung der Prüfenergie die berechneten Hauptzugspannungen größer sind als der Bemessungswert der Widerstandsgröße und kein Verbund-Sicherheitsglas verwendet wurde.

Tabelle A 15.1: Ergebnisse Glastafel 8 mm x 1.050 mm x 2.056 mm

Energie Stoßkörper	Theoretische Fallhöhe	Maximale Stoßkörperkraft	Maximale Hauptzugspannung in der Glastafel	Energie in der Glastafel	Bemerkung
[Nm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[Nm]	
221	450	9.987	181) ³⁴	-	$F_P < 0,85 F_{Pstarr}$
319	650	12.884	191) ³⁴	192	Nachweis bei überwachter Fertigung
387	790	14.483	202) ³⁴	231	Nachweis bei üblicher Fertigung

³⁴ $\sigma > \sigma_{R,d,ESG,Stoß}$, Spannung überschritten, Stoßhemmung nicht nachgewiesen

In Tabelle A 15.2 sind Ergebnisse von Pendelschlagversuchen nach DIN EN 12600 zusammengefasst. Die Abmessungen liegen nahe an der in diesem Beispiel untersuchten Geometrie.

Tabelle A 15.2: Bestandene Pendelschlagversuche nach DIN EN 12600 an Glastafeln aus 2 x 4 mm mit ähnlicher Geometrie

Fallhöhe [mm]	Glastafel			Pendelschlagversuch bestanden
	Breite	Höhe	Aufbau	
	[mm]	[mm]	[mm]	
450	1.050	2.056	8 ESG	[Rü 02a]
450	1.000	2.000	2 x 4 ESG	TRAV Anhang C
450	876	1.938	2 x 3 SPG	[Sc 01]
700	876	1.938	8 ESG	[Sc 02]
900	876	1.938	8 ESG	[Sc 01]
900	876	1.938	2 x 4 SPG	TÜV
900	1.000	2.000	2 x 4 SPG	RWTH-Aachen
900	1.050	2.056	8 ESG	[Rü 99a]

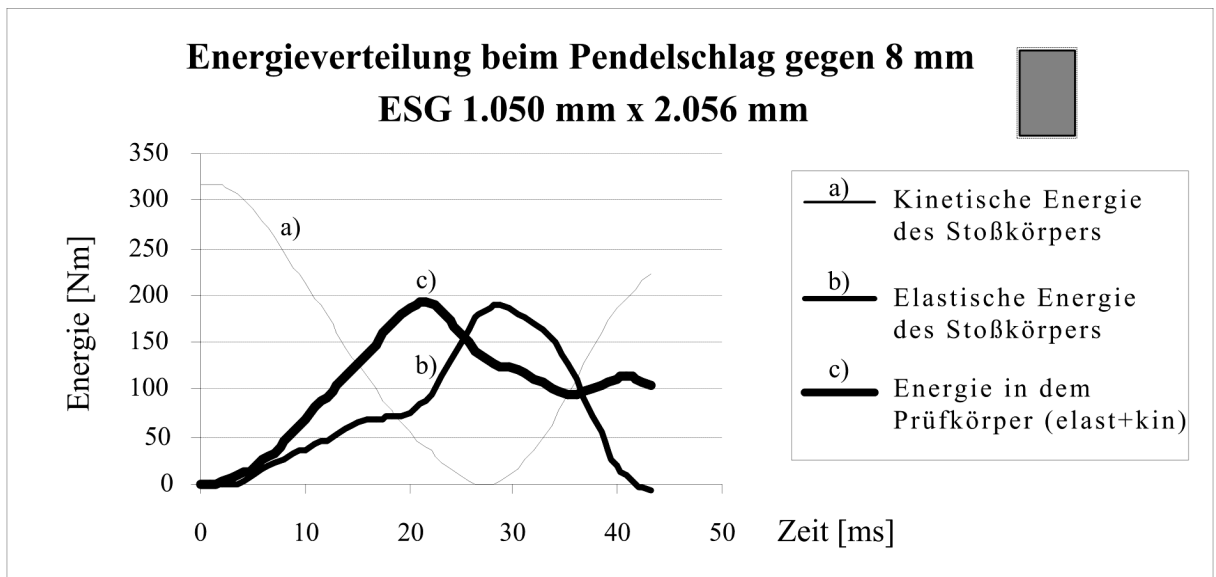
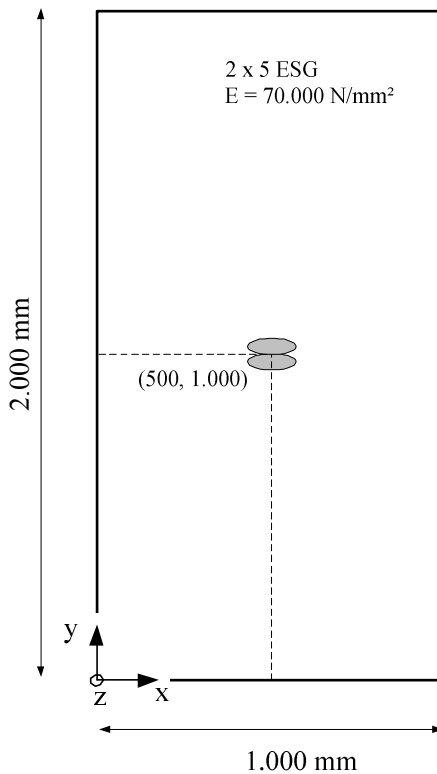


Bild A 15.3: Zeit – Energie – Verläufe während des Stoßes, Fallhöhe $h = 650$ mm

A 15.3 Glastafel 2 x 5 x 1.000 x 2.000



Eine Glastafel aus 2 x 5 mm ESG mit den Abmessungen 1.000 mm x 2.000 mm (Bild A 15.4) ohne vorgesetzten Handlauf in einer Höhe zwischen 85 cm und 115 cm über der Oberkante Fußboden ist nach [TRAV 03] als raumhohe Verglasung (Kategorie A) anzusehen. Die Tafel lässt sich nach Anhang C der [TRAV 03] mit einer Spannung von $1,4 \cdot 141,0 = 197,4 \text{ N/mm}^2$ nicht nachweisen.

Nachfolgend wird die Glastafel unter der Voraussetzung einer kontrollierten und mängelfreien Ausführung mit dem Bemessungsvorschlag der vorliegenden Arbeit (Kapitel 4) untersucht.

Für die Baupraxis ausreichend genau, wird in erster Näherung mit dem statischen Elastizitätsmodul E_{stat} und der Nenndicke 10 mm gerechnet (siehe Kapitel 3.9).

Bild A 15.4: Abmessungen, Aufbau und Auftreffort

Mit dem Ergebnis aus Tabelle wäre diese „leichte“ Glastafel als absturzhemmend einsetzbar. Voraussetzung ist eine überwachte Ausführung (Einbau ohne Zwängungen, Kantenschäden oder Kratzer etc.), da die entsprechende Nachweisenergie ($E_{\text{d,aG}}$) nach Abschnitt 4.2.1 verwendet wurde. Die Bemessungswerte der Hauptzugspannungen ($\sigma_{\text{R,d,ESG,Stoß}}$) sind im Glas eingehalten, damit ist diese Glastafel bei Menschenanprall tragsicher. Die zugehörigen Zeit-Energie – Verläufe der kinetischen und elastischen Energie sind in Bild A 15.5 dargestellt.

Tabelle A 15.3 Ergebnisse Glastafel 2 x 5 mm x 1.050 mm x 2.056 mm

Energie Stoßkörper	Theoreti- sche Fall- höhe	Maximale Stoßkörper- kraft	Maximale Haupt- zugspannung in der Glastafel	Energie in der Glastafel	Bemerkung
[Nm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[Nm]	
221	450	10.547	124	-	$F_P < 0,85 F_{Pstarr}$
343	700	13.604	146 < $\sigma_{R,d,ESG,Stoß}$	194	Nachweis bei überwachter Fertigung

In Tabelle A 15.3 sind Ergebnisse von Pendelschlagversuchen nach DIN EN 12600 und ähnlicher Glastafelgeometrie zusammengestellt.

Tabelle A 15.4: Bestandene Pendelschlagversuche nach DIN EN 12600 an Glastafeln aus 2 x 5 mm mit ähnlicher Geometrie

Fallhöhe [mm]	Glastafel			Pendelschlagversuch bestanden
	Breite	Höhe	Aufbau	
	[mm]	[mm]	[mm]	
450	2.000	1.000	2 x 5 SPG	TRAV Tabelle 2
450	1.000	2.000	2 x 5 ESG	TRAV Anhang C
700	1.008	3.082	2 x 5 SPG	FH-München
900	1.000	2.000	2 x 4 SPG	RWTH-Aachen

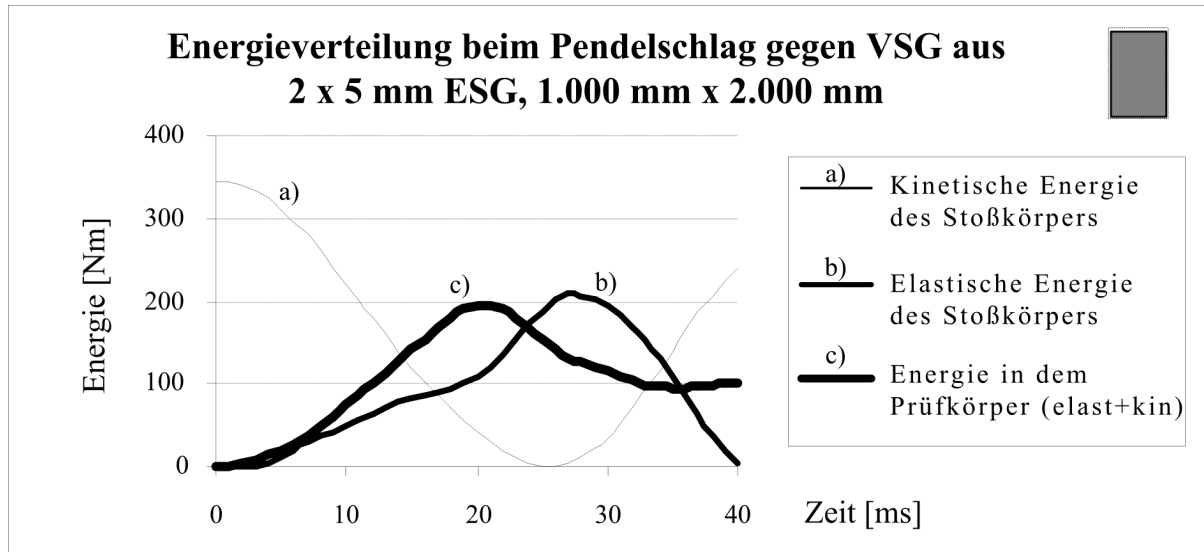


Bild A 15.5: Zeit – Energie – Verläufe während des Stoßes, Fallhöhe $h = 700 \text{ mm}$

A 15.4 Glastafel 10 x 1500 x 3.000

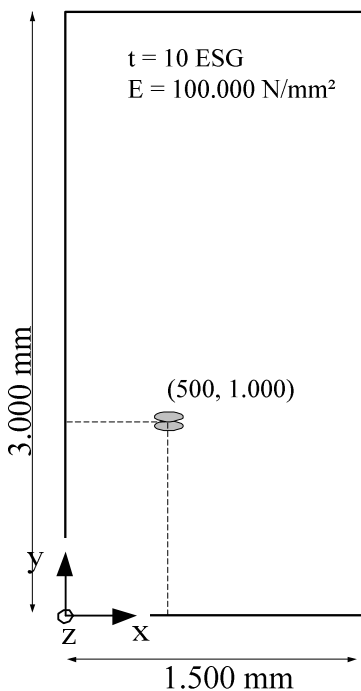


Bild A 15.6: Abmessungen, Aufbau und Auftreffort

Die rechteckige Glastafel mit den Abmessungen 10 mm x 1.500 mm x 3.000 mm ESG (Bild A 15.6) kann nach Anhang C der [TRAV 03] bemessen werden. Allerdings ist der rechnerische Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartiger Einwirkung nach TRAV nicht erfüllt:

$$135 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,4 = 189 \text{ N/mm}^2 > 170 \text{ N/mm}^2.$$

Beim Vorgehen des entsprechenden Bemessungsvorschlags wird die erforderliche Nachweisenergie ($E_{d,aG}$) bei einer Fallhöhe von 750 mm übertragen (Tabelle A 15.5). Die berechneten Hauptzugspannungen liegen dabei unter dem Bemessungswert der Hauptzugspannungen ($\sigma_{R,d,ESG,Stoß}$). Damit ist die Glastafel absturzhemmend.

Der Energieverlauf während des Stoßes ist in Bild dargestellt.

Tabelle A 15.5 Ergebnisse Glastafel 10 mm x 1.500 mm x 3.000 mm

Energie Stoßkörper	Theoretische Fallhöhe	Maximale Stoßkörper- kraft	Maximale Haupt- zugspannung in der Glas- tafel	Energie in der Glasta- fel	Bemerkung
[Nm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[Nm]	
221	450	7.980	129	-	$F_P < 0,85 F_{Pstarr}$
368	750	10.874	160 $< \sigma_{R,d,ESG,Stoß}$	241	Stoßhemmung nachgewiesen

In Tabelle A 15.6 sind Ergebnisse von Pendelschlagversuchen nach DIN EN 12600 und ähnlicher Glastafelgeometrie zusammengestellt.

Tabelle A 15.6: Bestandene Pendelschlagversuche nach DIN EN 12600 an Glastafeln aus 2 x 5 mm mit ähnlicher Geometrie

Fallhöhe [mm]	Glastafel			Pendelschlagversuch bestanden
	Breite	Höhe	Aufbau	
	[mm]	[mm]	[mm]	
450	1.500	3.000	2 x 5 SPG	TRAV Tabelle 2
450	1.500	3.000	2 x 4 ESG	TRAV Anhang C
900	2.000	3.000	2 x 4 SPG	RWTH-Aachen
900	1.200	3.840	2 x 5 SPG	VA-Karlsruhe

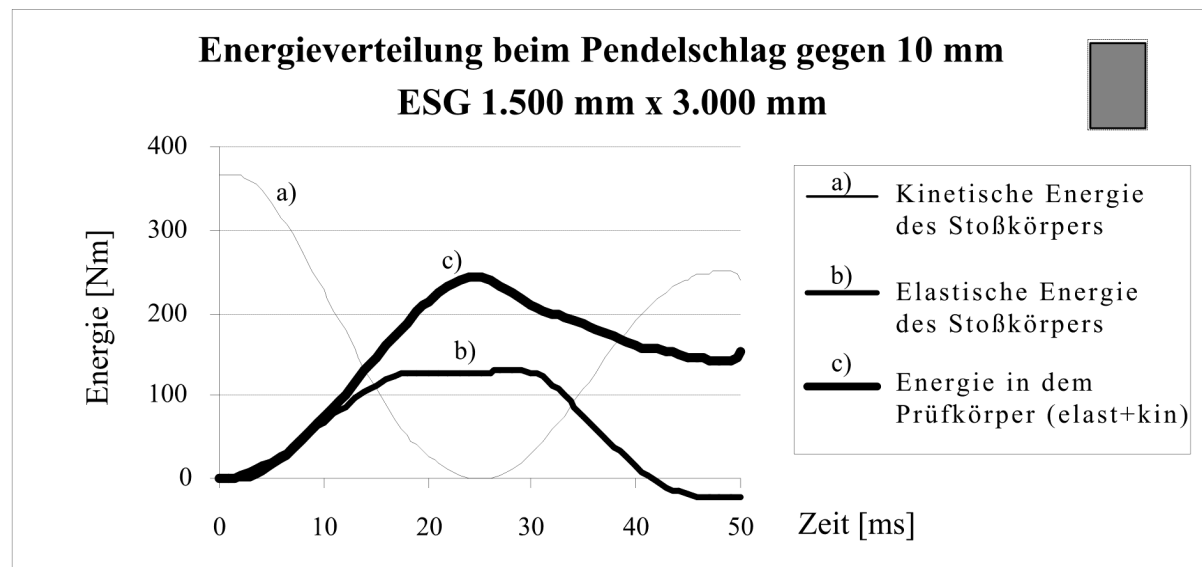


Bild A 15.7: Energieanteile während des Stoßes, Fallhöhe $h = 750 \text{ mm}$

A 15.5 Glastafel 12 x 3.200 x 6.000

Die Glastafel mit den Abmessungen 12 mm x 3.200 mm x 6.000 mm hat ein Gewicht von 5.760 N. Beim Anprall des Stoßkörpers aus 450 mm Fallhöhe entsteht eine Stoßkörperreaktionskraft von 11.653 N. Dieser Wert liegt über dem Grenzwert mit 11.220 N. Damit ist diese Glastafel absturzhemmend.

Tabelle A 15.6: Ergebnisse Glastafel 12 mm x 3.200 mm x 6.000 mm

Energie Stoßkörper	Theoretische Fallhöhe	Maximale Stoßkörper- kraft	Maximale Haupt- zugspannung in der Glas- tafel	Energie in der Glasta- fel	Bemerkung
[Nm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[Nm]	
221	450	11.653	23 $< \sigma_{R,d,ESG,Stoß}$	-	$F_P > 0,85 F_{Pstarr}$ Stoßhemmung nachgewiesen

In Tabelle A 15.7 sind Ergebnisse von Pendelschlagversuchen nach DIN EN 12600 und ähnlicher Glastafelgeometrie zusammengestellt.

Tabelle A 15.7: Bestandene Pendelschlagversuche nach DIN EN 12600 an Glastafeln aus 12 mm mit ähnlicher Geometrie

Fallhöhe [mm]	Glastafel			Pendelschlagversuch bestanden
	Breite	Höhe	Aufbau	
	[mm]	[mm]	[mm]	
900	2.800	3.286	2 x 6 SPG	FH-München
900	2.250	3.300	2 x 6 SPG	FH-München
900	2.000	4.000	2 x 6 ESG	TRAV Anhang C
900	2.620	4.410	2 x 6 SPG	FH-München

A 15.6 Glastafel 8 x 4.000 x 2.000 allseitig gelagert

Tabelle A 15.8: Ergebnisse Glastafel 8 mm x 4.000 mm x 2.000 mm

Energie Stoßkörper	Theoretische Fallhöhe	Maximale Stoßkörper- kraft	Maximale Haupt- zugspannung in der Glastafel	Energie in der Glastafel	Bemerkung
[Nm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[Nm]	
441	900	9.953	103 < $\sigma_{R,d,ESG,Stoß}$	426	In TRAV enthalten

Die „leichte“ Glastafel wird vom Stoßkörper stark beschleunigt und verformt. Eine Verformung ist ein Weg über der Zeit, d. h. eine Geschwindigkeit. Somit speichert die Glastafel neben der elastischen Energie einen großen Anteil an kinetischer Energie (Bild A 15.8).

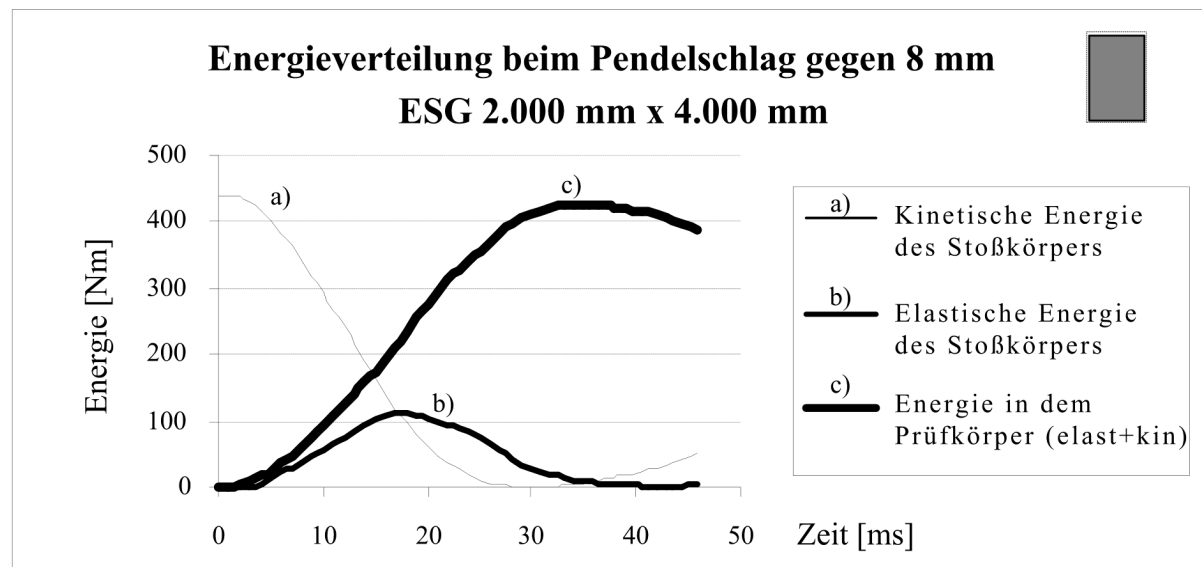


Bild A 15.8: Zeit – Energie – Verläufe während des Stoßes, Glastafel 8 x 2.000 x 4.000

A 15.7 Glastafel 8 x 2.000 x 1.000 zweiseitig gelagert

Tabelle A 16.9: Ergebnisse Glastafel 8 mm x 2.000 mm x 1.000 mm

Energie Stoßkörper	Theoretische Fallhöhe	Maximale Stoßkörper- kraft	Maximale Haupt- zugspannung in der Glas- tafel	Energie in der Glasta- fel	Bemerkung
[Nm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	[Nm]	
441	900	9.435	179 < $\sigma_{R,d,ESG,Stoß}$	437	In TRAV enthalten

Die zweiseitig gelagerte Glastafel ist ebenfalls als „leichte“ Glastafel einzustufen. Sie reagiert auf den Pendelschlag mit großen Verformungen. Der größte Teil der einwirkenden Energie des Stoßkörpers wird als kinetische Energie infolge der Beschleunigung umgesetzt.

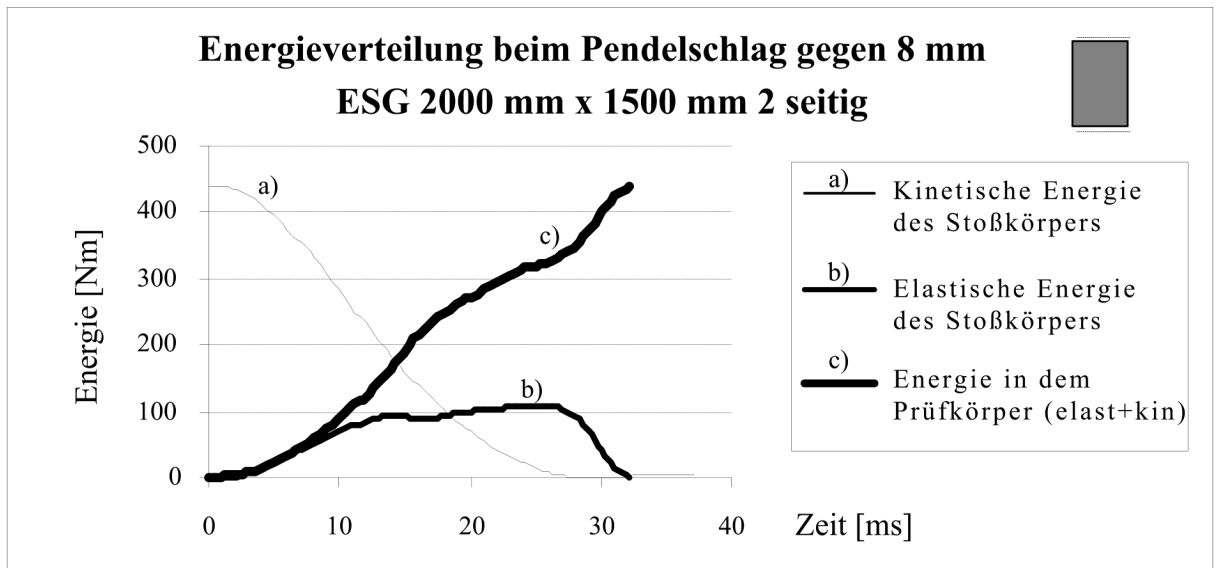


Bild A 15.9: Zeit – Energie – Verläufe während des Stoßes, Glastafel 8 x 2.000 x 1.000, zweiseitig gelagert

Hinweis: Bei zweiseitig gelagerten Verglasungen bestimmen die Kantenfestigkeiten den Versuchsausgang maßgeblich. Je nach Fertigungsqualität (scharfe Bruchkante, geschliffen oder poliert) oder vorhandenen Kantenschäden können die Versuchsergebnisse stark streuen. Eine mechanische Sicherung (Bohrungen im Glas mit durchgehenden Schraubenbolzen) an der Oberkante von raumhohen absturzsichernden Glastafeln ist bei zweiseitiger Lagerung sinnvoll.

A 15.8 Vergleich zwischen Berechnungsergebnissen des linearen Zweimassenschwingermodells und SJ MEPLA

Tabelle A 16.9: Berechnungsergebnissen des linearen Zweimassenschwingermodells und SJ MEPLA

Nr.	Bemerkung	Stoßkörperkraft [kN]	Max. Zugspannung [N/mm ²]	Verschiebung [mm]	Methode	Federsteifigkeit [N/mm]
1	Versuchsergebnisse, [Rü 02a] Abschnitt 5.23	8,2	130,2	-	-	-
Rechenergebnisse verschiedener Ansätze						
2	Einzellast Fourierreihe	5,1	-	27,1	geometrisch linear	190,3
3	Pendelstoß 2 MS, 450 mm Fallhöhe	5,1	-	34,7	geometrisch linear	-
4	Einzellast SJ MEPLA	5,1	129,4	30,0	geometrisch linear	172,0
5	Einzellast SJ MEPLA	5,1	94, 8	18,8	geometrisch nichtlinear	273,5
6	Pendelstoß SJ MEPLA, 450 mm Fallhöhe	8,6	187,6	43,2	geometrisch linear	-
7	Pendelstoß SJ MEPLA, 450 mm Fallhöhe	10,1	148,9	30,5	geometrisch nichtlinear	-

Danksagung

Diese Arbeit entstand in vielen Abend- und Nachtstunden, an Wochenenden und in Urlaubszeiten neben meiner beruflichen Tätigkeit bei der Landesstelle für Bautechnik, Baden-Württemberg, wo ich die Gelegenheit hatte, bei der täglichen Arbeit Erfahrungen im konstruktiven Glasbau zu sammeln.

Ich danke Herrn Professor Dr. T. Ummenhofer für die gewährte Unterstützung und die Übernahme des Hauptberichtes. Herrn Professor Dr. U. Peil danke ich für die freundlichen Hinweise und die Übernahme des Mitberichtes. Bei Herrn Professor Budelmann und Herrn Professor Empelmann bedanke ich für das Interesse an dieser Arbeit.

Auch Herrn Professor Dr. Ö. Bucak gilt mein Dank für die gewährte Unterstützung und die Nutzung seiner Versuchseinrichtung sowie die Überlassung von Versuchsdaten. Dank gilt auch Alexander Lorenz für seine Unterstützung bei meinen Versuchen und seinen Kollegen Stefan Koch und Stephan Bugger.

Ich danke Frau Professor Dr. Silvia Weber für die Nutzungsmöglichkeit von Prüfeinrichtungen.

Diese Arbeit entstand unter Anwendung der Programme SJ MEPLA und LS-DYNA. Ich danke Herrn Dr. Dirk Bohmann für die Möglichkeit zur Nutzung von SJ MEPLA und die Überlassung von Messdaten. Herrn Dr. André Haufe und seinem Arbeitgeber DYNAMORE danke ich für die Programmlizenz von LS-DYNA und viele fachliche Diskussionen.

Diskussionen und Gespräche mit Fachkollegen und Freunden haben diese Arbeit durchgehend begleitet. Hier möchte ich besonders Dr. Nils Albrecht, Thorsten Gerlinger, Dr. Manfred Gränzer – der mich in statistischen Fragen unterstützt hat –, Herrn Professor Dr. Maier, Andreas Reidt, Dr. Holger Steeb, Dr. Christian Schuler und Dr. Jens Schneider erwähnen. Herr Dr. Schneider hat mir wie auch Dr. Roland Rück und Professor Dr. Feldmeier Messdaten zur Verfügung gestellt, die mir sehr geholfen haben. Dank gilt in diesem Zusammenhang auch meinen Kollegen von der Landesstelle für Bautechnik. Den Kollegen der Prüfstellen Baitinger, Friedmann und Kirchner für den Erfahrungsaustausch.

Dass diese Arbeit angenehmer zu lesen ist, geht auf den stilistischen Einfluss von Dr. Ludwig Reiners † und das Lektorat von Frau Margot Herr zurück. Auch meinem ehemaligen Vorgesetzten Herrn Dr. Gerhard Werner, der überhaupt eine Dissertation angeregt und immer an mich geglaubt hat, danke ich für seine Lesebereitschaft und alles andere.

Wie bereits erwähnt, entstand diese Arbeit in meiner Freizeit – hier gebührt großer Dank meiner Familie für ihre Unterstützung.

Stefan Brendler

Stichwortverzeichnis

Stichwort	Seite
Ablaufdiagramm zum Bemessungsvorschlag	134
Anwendbarkeitsnachweis	11
Auflagerverkürzung	137
Baurecht	11
Bemessungswert der Nachweisenergie	128
Benchmark → Validierung	68
Charakteristische Energie (Basisenergie) beim Menschenanprall	27, 126
Dummy	172
Elastizitätsmodul dynamisch	114
ETB	18
Generalisierte Masse	55
Konstruktionen mit besonderen Anforderungen	180
Kontrollen der Bauausführung	138
Laufgeschwindigkeiten von Menschen	206
LS-DYNA	93
Parameterstudien zum Pendelschlagversuch	81
Pendelschlagversuch	30
Schwabbelmasse	152
SJ MEPLA	78
Stoßkörper (Pendel mit Zwillingsreifen)	33, 45
TRAV	22
UEATc	14
Validierung des Finite Elemente Modells	68
Variationskoeffizient von Glas	40, 128
Verletzungsrisiko beim Anprall an Glasbauteile	157
Verwendbarkeitsnachweis	11
Wellenausbreitung	50
Wirksame Masse des Menschen	146

Lebenslauf

Name:	Stefan Alexander Brendler
Geburtsdatum:	26. März 1970
Geburtsort:	Sonthofen / Allgäu
03/2006 -	Mitarbeiter der Projektgruppe „Erdbebensicherheit im Gebäudebestand“ www.erdbeben-bw.de
11/2005	Ernennung zum Baurat auf Lebenszeit
08/2005-04/2006	Kommisarischer Leiter des Impuls-Programm Altbau; Organisatorisch wurde das Impuls-Programm Altbau am 01.04.2006 der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH zugeordnet
03/2006 -	Berufung in den Sachverständigenausschuss Glasbau A1 und B des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin
12/2002	Übernahme in das Beamtenverhältnis; Baurat z.A.
10/1999 - 03/2004	Lehrtätigkeit als Dozent in Technischer Mechanik und Festigkeitslehre an der Berufsakademie Mosbach
01/1999 -	angestellt als Referent beim Landesgewerbeamt, Landesstelle für Bautechnik
10/1996 - 12/1998	Projektingenieur bei DELTA-X GmbH Ingenieurgesellschaft, Gesellschaft für Strukturanalyse, Dr.-Ing. A. Burmeister, Prof. Dr.-Ing. E. Ramm, Stuttgart. Tätigkeitsfelder: Bauwesen (Schwerpunkt Glas- und Stahlbau), Baumaschinen, Fahrzeugbau, Elektrotechnik
07/1996 - 09/1996	Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Baustatik an der Universität Stuttgart
10/1991 - 07/1996	Studium im Fachbereich Bauingenieurwesen an der Universität Stuttgart Vertiefungsfächer: Baustatik, Massivbau, Werkstoffkunde / Bauphysik
07/1991 - 10/1991	Zivildienst bei der Caritas, Sonthofen (individuelle Schwerstbehinderten Betreuung)
07/1990 - 04/1991	Grundwehrdienst in Bruchsal
09/1981 - 06/1990	Gymnasium in Sonthofen
09/1980 - 08/1981	Hauptschule in Blaichach
09/1976 - 08/1980	Grundschule in Blaichach